

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Saša Petrović

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zvonko Herold, dipl. ing.

Student:

Saša Petrović

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svojem mentoru, prof. dr. sc. Zvonku Heroldu, koji mi je svojim znanjem i iskustvom pružio savjete i stručnu pomoć pri izradi diplomskog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i stvaranju uvjeta kroz moje cijelo obrazovanje.

Zahvaljujem svim onima koji nisu željeli biti imenovani, prijateljima i kolegama s kojima sam proveo ove studentske dane koji su izravno ili neizravno doprinijeli uspješnom završetku mog studija.

Saša Petrović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Saša Petrović**

Mat. br.: **0035160346**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

VIBRACIJSKA DROBILICA ZA KAMEN

Naslov rada na
engleskom jeziku:

VIBRATIONAL STONE CRUSHER

Opis zadatka:

Za preradu kamena i proizvodnju agregata u kamenolomu potrebno je proučiti tehnologiju drobljenja i strojeve za usitnjavanje kamena. Napraviti pregled drobilica s tehničkim karakteristikama, veličinama i kapacitetima, uz objašnjenje kinematike rada za različite važnije tipove strojeva za usitnjavanje kamena uz usporedbu radnog učinka i područja primjene. Na kraju, potrebno je projektirati, oblikovati i konstrukcijski razraditi vibracijski stroj za usitnjavanje kamena na temelju patentnog spisa.

Projektni parametri su:

- frekvencija: 950 – 1000 titraja/min (uz regulaciju broja okretaja),
- amplituda: 14 mm (maksimalno do 20 mm),
- granulacija kamena, ulaz/izlaz: 220/80 mm,
- širine radnih ploha: 1600 mm,
- pogonska energija: električna 3×400 V,
- predvidjeti sigurnosne uređaje.

Projekt treba sadržavati:

- uvodno razmatranje o usitnjavanju kamena uz podjelu drobilica,
- analizu i sintezu različitih radnih principa postojećih strojeva za usitnjavanje kamena,
- nekoliko konceptijskih rješenja vibracijskog stroja za usitnjavanje kamena,
- izbor optimalne varijante za zadane projektne zahtjeve,
- proračun nosive konstrukcije, ekscentar masa i dijelova za pogon i prijenos snage,
- sklopni crtež vibracijskog stroja za usitnjavanje kamena s potrebnim presjecima i detaljima,
- radioničke crteže svih nestandardnih dijelova.

Pri projektiranju treba rabiti važeće tehničke propise za sigurnost strojeva i uređaja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

26. travnja 2012.

28. lipnja 2012.

04., 05. i 06. srpnja 2012.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonko Herold

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK	IX
1. UVODNE NAPOMENE	1
2. USITNJAVANJE KAMENA I OSNOVNI POJMOVI	2
3. PODJELA DROBILICA S ANALIZOM RADNIH PRINCIPA	5
3.1. Čeljusne drobilice	6
3.2. Kružne drobilice	14
3.3. Udarne drobilice	17
3.4. Drobilice s valjcima	19
4. KONCEPCIJSKA RJEŠENJA	20
4.1. Lista zahtjeva, funkcijska dekompozicija, morfološka matrica i koncepti	20
4.2. Opis i ocjenjivanje koncepata	25
5. PROJEKTIRANJE	30
5.1. Proračun	30
5.1.1. Pogonski motor	30
5.1.2. Remenski prijenos	33
5.1.3. Prijenosnik	36
5.1.3.1. Zupčanici	37
5.1.3.2. Vratila prijenosnika	43
5.1.3.3. Ležajevi za vratila prijenosnika	61
5.1.4. Utezi	64
5.1.5. Pogonska vratila	66
5.1.6. Ležajevi pogonskih vratila	74
5.1.7. Gumene opruge	76
6. ZAKLJUČAK	79
PRILOZI	81
LITERATURA	82

POPIS SLIKA

Slika 1.	Principi djelovanja strojeva za usitnjavanje prikazani su slijedećim redoslijedom: gnječenje, cijepanje, udar, trenje, kidanje, savijanje.....	3
Slika 2.	Čeljusna drobilica tipa Blake.....	7
Slika 3.	Čeljusna drobilica tipa Dodge	8
Slika 4.	Čeljusna drobilica Telsmith.....	9
Slika 5.	Čeljusna drobilica Sturtevant.....	10
Slika 6.	Čeljusna drobilica Kue-Ken	10
Slika 7.	Čeljusna drobilica Eimco-Fahremwald	11
Slika 8.	Čeljusna drobilica Gauldie	12
Slika 9.	Čeljusna drobilica Gaul Čeljusna drobilica Rotex.....	13
Slika 10.	Udarna čeljusna drobilica	13
Slika 11.	Kružna drobilica McCully	15
Slika 12.	Kružna drobilica Telsmith.....	16
Slika 13.	Kružna drobilica Symons	16
Slika 14.	Udarna drobilica	17
Slika 15.	Čekičara.....	18
Slika 16.	Valjkasta drobilica s nazubljenim valjcima.....	19
Slika 17.	Skica 1 iz spisa.....	22
Slika 18.	Skica 2 iz spisa.....	22
Slika 19.	Ukupna funkcija stroja	23
Slika 20.	Funkcijska dekompozicija vibracijske drobilice kamena.....	23
Slika 21.	Morfološka matrica i generiranje koncepata	24
Slika 22.	Koncept 1	25
Slika 23.	Koncept 2	26
Slika 24.	Koncept 3	27
Slika 25.	Koncept 4	28
Tablica 1.	Ocjenjivanje koncepata	29
Slika 26.	Skica za proračun remenskog prijenosa	33
Slika 27.	Skica prijenosnika	36
Slika 28.	Skica za proračun sila koje djeluju na ulazno vratilo.....	44
Slika 29.	Skica za proračun vratila u pojedinim presjecima	46

Slika 30.	Skica za proračun sila koje djeluju osovinu	50
Slika 31.	Skica za proračun osovine u pojedinim presjecima	52
Slika 32.	Skica za proračun sila koje djeluju na izlazno vratilo	54
Slika 33.	Skica za proračun vratila u pojedinim presjecima	57
Slika 34.	Uteg za grubo balansiranje	64
Tablica 2.	Centrifugalne sile	65
Slika 35.	Skica za proračun sila koje djeluju na pogonsko vratilo	66
Slika 36.	Skica za proračun vratila u pojedinim presjecima	67
Slika 37.	Skica za proračun iz FAG-ovog kataloga	74
Slika 37.	Konstruktivsko oblikovanje ležajnih mjesta prema [24.]	76
Slika 38.	Skica za proračun iz kataloga [26.]	77
Slika 39.	Jedan od kasnijih modela drobilice	78

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Ocjenjivanje koncepata	9
Tablica 2.	Centrifugalne sile	65

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
VD-S	Vibracijska drobilica
VD-PST	Postolje
VD-GO	Gornji okvir
VD-GO-V	Vratilo
VD-V-DP1	Distantni prsten 1
VD-V-U1	Glavni uteg
VD-V-U2	Mali uteg
VD-V-LM	Ležajno mjesto
VD-V-PL1	Poklopac ležaja 1
VD-V-PL2	Poklopac ležaja 2
VD-V-PB	Poklopac za brtvljenje
VD-V-PK	Prirubnica 1
VD-V-PLM	Prirubnica ležajnog mjesta
VD-V-UDP	Unutrašnji distantni prsten
VD-V-UPL1	Unutrašnji poklopac ležaja 1
VD-V-UPL2	Unutrašnji poklopac ležaja 2
VD-V-P3	Pločica 3
VD-DO	Donji okvir
VD-DO-P1	Ploča 1 - DO
VD-DO-P2	Ploča 2 - DO
VD-NO	Nosač opruge
VD-U	Ulaz
VD-V-C	Cijev
VD-UP1	Udarna ploča
VD-UP2	Udarna ploča 2
VD-IV	Vratilo za regulaciju
VD-PR	Prijenosnik
VD-PR-K	Kućište prijenosnika

VD-PR-P	Prirubnica - PR
VD-PR-VU	Vratilo ulazno - PR
VD-PR-VI	Vratilo izlazno - PR
VD-PR-OS	Osovina - PR
VD-PR-Z	Zupčanik
VD-PR-DP1	Distantni prsten 1 - PR
VD-PR-DP2	Distantni prsten 2 - PR
VD-PR-DP3	Distantni prsten 3 - PR
VD-PR-O	Odušak
VD-PR-S	Staklo
VD-PR-VU	Vijak za ispušt ulja
VD-PR-PK1	Poklopac 1
VD-PR-PK2	Poklopac 2
VD-PR-PK3	Poklopac 3
VD-RP-1	Remenica 1
VD-RP-2	Remenica 2
VD-RP-3	Pločica 1
VD-RP-4	Pločica 2
VD-Z1	Zaštita 1
VD-Z2	Zaštita 2
VD-Z3	Zaštita 3

POPIS OZNAKA

SIMBOLI:

Oznaka	Jedinica	Opis
I	kgm^2	dinamički moment inercije
t	s	vrijeme
n	$\text{min}^{-1}, \text{s}^{-1}$	broj okretaja
T	Nm	moment torzije
P	W, kW	snaga
v	m/s	brzina
d	mm	promjer
z		broj, količina
u		prijenosni omjer reduktora
i		prijenosni omjer
b	mm	širina
F	N	sila
S		faktor sigurnosti
G	N	težina
M	Nm	moment savijanja
ε	s^{-2}	kutno ubrzanje
ω	s^{-1}	kutna brzina
η		iskoristivost, stupanj djelovanja
σ	N/mm^2	naprezanje

INDEKSI:

Oznaka	Opis
uk	ukupno
ut	uteg
v	vratilo
red	prijenosnik / reducirano
k	kardansko vratilo
RP	remenski prijenos
L	ležaj
EM	elektromotor
potr	potrebno
R1	remenica 1
R2	remenica 2
N	nazivno
max	maksimalno
min	minimalno
z	zupčanik
p	prirubnica
A	oslonac A
B	oslonac B
dop	dopušteno
V	vertikalno
H	horizontalno
c	centrifugalno

SAŽETAK

U ovome radu potrebno je projektirati, oblikovati i konstrukcijski razraditi vibracijski stroj za usitnjavanje kamena na temelju patentnog spisa. Rad se sastoji od uvodnih napomena, četiri glavna poglavlja i zaključka. Na početku su definirani osnovni pojmovi i objašnjena je tehnologija i princip drobljenja. Zatim je dana podjela drobilica s analizom njihovih radnih principa. Nakon toga se nalazi poglavlje s izradom i izborom koncepata. U najvećem poglavlju nalazi se projektiranje vibracijske drobilice za kamen prema izabranom konceptu.

1. UVODNE NAPOMENE

Cilj ovog rada je izrada prototipa vibracijske drobilice kamena. Na početku rada se nalazi poglavlje o usitnjavanju kamena u kojemu su dani osnovni pojmovi i mehanizmi usitnjavanja. Sljedeće poglavlje odnosi se na drobilice u kojemu je uz podjelu drobilica i opis glavnih dijelova dan i njihov način rada, te dostupni podaci. Veći je naglasak stavljen i detaljnije su opisane čeljusne i kružne drobilice, budući da su one najvažnije. U poglavlju vezanom za konceptijska rješenja nalazi se postupak kako se došlo do njih i kako su izabrani, bez općenitih poglavlja o pojmovima, primjerice funkcijske dekompozicije i slično. Nakon izbora konačnog koncepta, nalazi se veliko poglavlje koje se odnosi na projektiranje drobilice s konačnim rješenjem.

U tekstu i proračunu gdje je bilo potrebno pozvati se na literaturu, u uglatoj zagradi naveden je redni broj iste. Slike priložene uz tekst izvađene su većinom iz dostupne literature ili sa Interneta i obrađene su u programu Adobe Photoshop CS3 (izoštavanje, kontrast, veličina i slično). U radu su korištene DIN norme. Uz proračun strojnih dijelova priložene su skenirane i obrađene ručne skice korištene prilikom proračuna. Skenirane skice također su priložene u onim dijelovima ovog rada gdje ih se još koristilo, primjerice tijekom izrade koncepata i slično. Početni trodimenzionalni model drobilice izmodeliran je u programu Pro/ENGINEER Wildfire 4.0, a zbog jednostavnosti i lake mogućnosti izmjene i prilagodbe tehnički crteži su izrađeni u programu AutoCAD 2011, kao i naknadne izmjene. Većina dijelova drobilice koje nije bilo potrebno računati (primjerice neki vijci, zavari, pa i neki presjeci) ipak su sa strane provjereni vrlo grubim proračunom ($\text{naprezanje} = \text{sila} / \text{površina}$) kako bi se osiguralo da neki dio nije previše predimenzioniran ili premalih dimenzija.

2. USITNJAVANJE KAMENA I OSNOVNI POJMOVI

Drobljenje [1.] je prvi stupanj usitnjavanja, fizikalnog postupka smanjivanja zrna čvrstog materijala njegovim razbijanjem pomoću vanjskih sila. Osim drobljenja, usitnjavanje obuhvaća i mljevenje kao drugi tehnološki stupanj, ali u principu između drobljenja i mljevenja nema razlike.

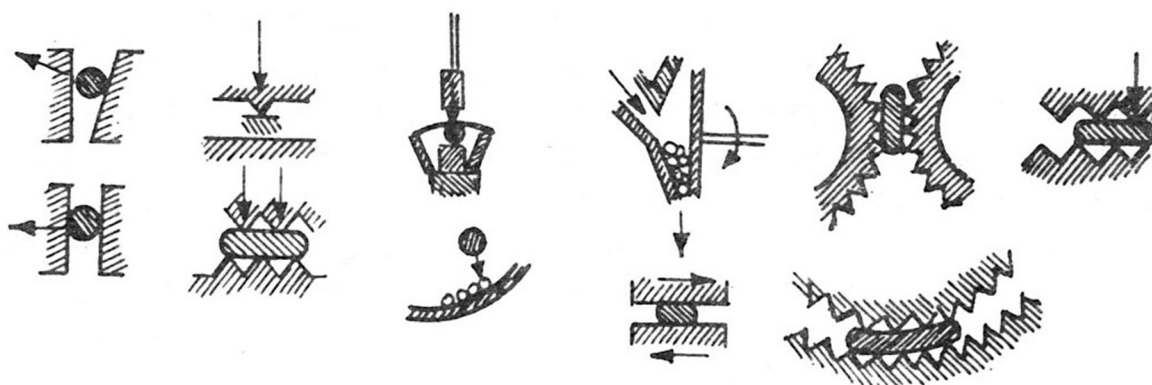
U nekoj se literaturi [2.], [3.] ne radi razlika između pojma drobljenja i pojma usitnjavanja kamenog materijala, nego se razlikuje sljedeća tri stupnja drobljenja:

- primarno,
- sekundarno,
- tercijarno.

U primarno drobljenje ubraja se usitnjavanje sirovog iskopanog materijala promjera 70 do 100 ili 150 cm. Sekundarnim drobljenjem materijal se usitjava do propisanih frakcija. U tercijarnom drobljenju dolazi do korekcije ili kompenzacije, odnosno prerade viška krupnijih frakcija da bi se popunio manjak u sitnim frakcijama. U toj literaturi ova tri stupnja ujedno i definiraju podjelu drobilica na primarne, koje su kako im ime kaže vezane za primarno drobljenje, sekundarne drobilice, te mlinove za tercijarno drobljenje. Razlika između ovakvog tumačenja i onog u prvom odlomku je u tome da ovdje unutar samog drobljenja razlikujemo još primarno i sekundarno drobljenje, dok je tercijarno drobljenje isto kao i u prvom slučaju - mljevenje.

Dva osnovna mehanizma usitnjavanja su tlak i udar. Djelovanjem vanjske sile na mineralno zrno dolazi do deformacija u zrnu. Kada deformacije narastu toliko da dođe do kidanja veza u strukturi materijala, dolazi i do usitnjavanja zrna. Pored ovih osnovnih, dodatni mehanizmi usitnjavanja su:

- gnječenje,
- cijepanje,
- trenje,
- kidanje,
- savijanje.



Slika 1. Principi djelovanja strojeva za usitnjavanje prikazani su slijedećim redoslijedom: gnječenje, cijepanje, udar, trenje, kidanje, savijanje

U užem smislu možemo se i orijentirati samo na sljedeća tri tipa drobljenja:

- drobljenje tlakom,
- drobljenje udarom,
- drobljenje gnječenjem.

Drobljenje tlakom je drobljenje statičkim putem, drobljenje udarom je drobljenje dinamičkim putem i drobljenje gnječenjem je kombinacija navedenih drobljenja.

Razlika između drobljenja i mljevenja se obično vrši i prema veličini dobivenog produkta. Drobljenjem se dobivaju krupniji, a mljevenjem sitniji komadi. Kao praktična granica može se uzeti veličina od nekoliko milimetara, obično 5 mm. Razlika između drobljenja i mljevenja očituje se i u konstrukciji odgovarajućih strojeva tako da se u drobilicama radni elementi ne mogu međusobno dodirivati, a u mlinovima moglo bi doći do takvog kontakta da ga ne sprečava materijal koji se melje.

Primjena navedenih osnovnih načina drobljenja kamena ovisi prvenstveno o porijeklu i vrsti materijala odnosno o njegovim fizičko-mehaničkim svojstvima, zatim o ulaznim obilježjima materijala (primjerice veličina, oblik usitjenosti, sastav) koji se namjerava drobiti, o konačnoj veličini i obliku zrna, o konačnom granulometrijskom sastavu, o potrebnom učinku drobljenja, te o ostalim proizvodno-tehnološkim i organizacijskim posebnostima. Upravo je najvažnija ekonomičnost načina drobljenja koja bi morala za traženu kvalitetu i uz najveću moguću produktivnost dati najmanje proizvodne troškove, posebno one koji se odnose na utrošak pogonske energije i habajuće strojne dijelove koji vrše neposredno usitnjavanje kamena.

Procesi usitnjavanja važan su dio tehnološkog postupka, najviše u rudarstvu, ali također u industriji cementa, građevinarstvu, keramičkoj, farmaceutskoj i kemijskoj industriji općenito. U suvremenoj visokoproduktivnoj proizvodnji kvalitetne kamene sitneži za potrebe građenja koristi se samo strojni rad, kamena sitnež se drobi i sije u postrojenjima koja se zovu drobilane. U njih se dovozi sirovi kamen direktno iz kamenoloma.

Rad je u tehničkim procesima usitnjavanja vezan s velikim gubicima: za svladavanje kohezije čestica korisno se troši samo malen dio uloženog rada. Zato je koeficijent iskorištenja energije dosta nizak.

Svrha drobljenja, kao i općenito usitnjavanja, može biti dvojaka: proizvodnja zrna određenih veličina ili specifičnih površina i razdvajanje sraslih minerala.

Stupanj drobljenja je numerički pokazatelj učinka drobilice u pogledu smanjenja zrna. Obično se definira kao omjer između veličine najvećeg zrna prije i poslije drobljenja. Kod nekih tipova drobilica stupanj drobljenja može biti i promjenjiv. Stupanj drobljenja pojedinih vrsta drobilica razlikuje se unutar širokih granica. Primjerice, on iznosi od 3 do 7 za čeljusne drobilice, do 20 za Symonsovu drobicu, te do 50 za udarne drobilice.

3. PODJELA DROBILICA S ANALIZOM RADNIH PRINCIPA

Najjednostavnija i najopćenitija definicija drobilica jest da su to strojevi koji služe za drobljenje. Podjela strojeva za drobljenje može se provesti sa različitih gledišta. Razlike između materijala u pogledu tvrdoće, čvrstoće, lomljivosti, kalavosti, krtosti i stupnja sraslosti dovele su do podjele tehnike drobljenja na drobljenje:

- tvrdog,
- srednje-tvrdog i
- mekog materijala.

Prema razlikama između dimenzija najvećih komada materijala koji se drobe, odnosno zrna drobljenog materijala, razlikuju se:

- drobilice za primarno (grubo) i
- za sekundarno (srednje i fino) drobljenje.

Može se uzeti [1.] da primarne drobilice daju zrna veličine između 20 do 30 i 100 do 120 mm, a sekundarne proizvod manji od 20 do 30 mm pa do gornje granice mljevenja što iznosi nekoliko milimetara.

I ovdje postoji razlika ovisno o literaturi, tako da prema [2.] vrši se ista podjela drobljenja, samo se navode drugačiji podaci koji se odnose na veličinu zrna i podjela je detaljnija s više stupnjeva. Tu se razlikuje grubo drobljenje gdje je promjer zrna drobljenja iznad 64 mm, srednje grubo drobljenje do 64 mm, te sitno drobljenje do 32 mm. Zatim imamo grubo mljevenje promjera zrna do 4 mm, sitno mljevenje promjera do najviše 0,25 mm, iznimno 0,71 mm te koloidno mljevenje promjera čestica manjeg od 0,063 mm.

Pojedine konstrukcije strojeva za drobljenje rijetko se koriste samo jednim mehanizmom usitnjavanja kamena. Obično u jednom stroju dolazi do izražaja više načina drobljenja. Ipak, većinom prevladava samo jedan način, a drugi su pod-ređeni, pa se zato podjela po silama drobljenja prilično poklapa s podjelom drobilica po konstrukciji.

Strojevi načelno jednake konstrukcije upotrebljavaju se vrlo često, uz pogodne modifikacije izvedbe, za drobljenje i tvrdog i mekog materijala, i za grubo, srednje ili fino drobljenje, pa i za mljevenje. Podjela drobilica prema konstrukciji izvodi se na:

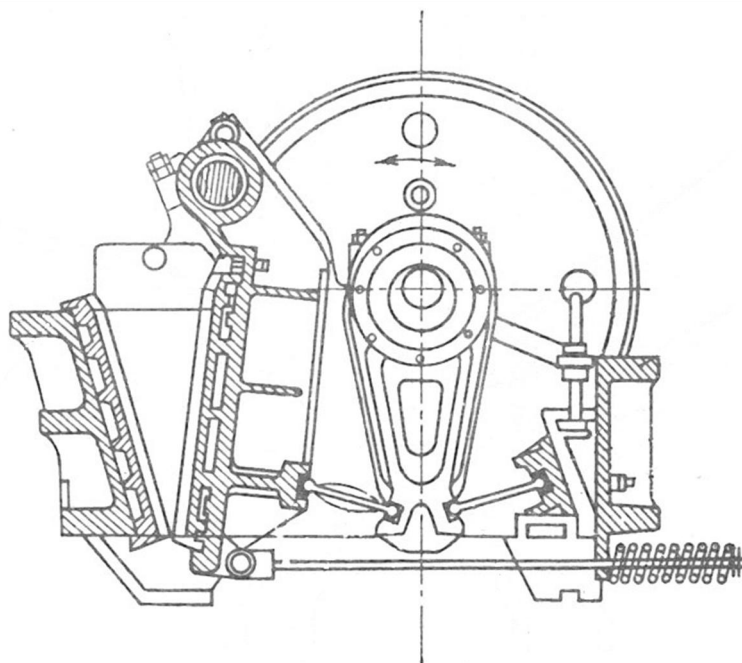
- čeljusne drobilice,
- kružne ili konusne drobilice,
- udarne drobilice i
- drobilice s valjcima.

Treba još napomenuti da postoje takozvani dezintegratori i stupe, odnosno klipne drobilice o kojima neće biti riječi u ovom radu zbog njihove ograničene i specifične primjene.

3.1. Čeljusne drobilice

Čeljusne drobilice su najstarija vrsta drobilica koja se još uvijek uspješno upotrebljava za drobljenje svih vrsta kamenih materijala bez obzira na njihova fizičko-mehanička svojstva. Razlog je njihova jednostavna radna koncepcija i konstrukcija, te razmjerno niski pogonskih i proizvodni troškovi.

Princip rada im je takav da materijal prvenstveno gnječe, a djelomično također rastiru u prostoru između dvije čeljusti, od kojih je jedna obično nepomično pričvršćena za okvir drobilice, a druga je pokretna. Otvor tog prostora na njegovu vrhu zove se ždrijelo, a otvor na dnu ispust. Širina ždrijela zove se zijeve. S obzirom na položaj osi oko koje oscilira pokretna čeljust, razlikuju se dva principa ostvarena u dva klasična tipa čeljusnih drobilica: tipa Blake i tipa Dodge. U drobilici prvog tipa os njihanja čeljusti nalazi se gore kod ždrijela, u drobilici drugog tipa ona je dolje kod ispusta.



Slika 2. Čeljusna drobilica tipa Blake

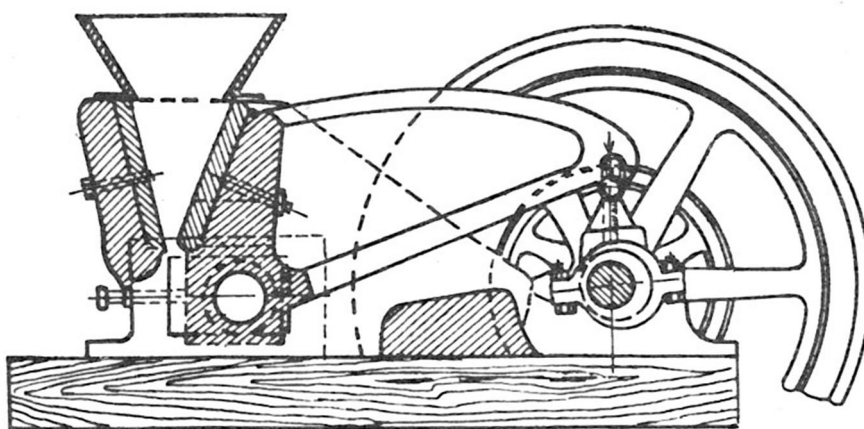
Čeljusna drobilica tipa Blake prikazana je na slici 2. Njezina konstrukcija i način rada su sljedeći. Na okviru od lijevanog čelika pričvršćeni su nepokretna čeljust, njihajna osovina, pokretna čeljust i pogonsko vratilo s ekscentrično učvršćenom glavnom polugom. Glavna poluga prenosi pogonsku silu motora na pokretnu čeljust preko dviju rasponih ploča. Ploče su na jednoj strani zglobovno pričvršćene za glavnu polugu. Na drugoj je strani lijeva ploča vezana za pokretnu čeljust, a desna za okvir drobilice. Kad se glavna poluga u toku prve polovine okretaja pogonskog vrtila diže, raspone ploče se približavaju vodoravnom položaju i razmak između čeljusti postaje manji. Pri tome se nasuti materijal gnječi i trlja između čeljusti. U drugoj polovini okretaja glavna poluga, a istovremeno s njom i pokretna čeljust, se vraća u početni položaj. U toj se fazi prostor za drobljenje povećava, materijal uslijed svoje težine klizi dublje, odnosno ispada iz drobilice ako je već dovoljno izdrobljen. Na putu u početni položaj pokretnu čeljust vuče još i zatezna šipka s oprugom.

Budući da se drobljenje odvija u ciklusima, opterećenje drobilice se mora kompenzirati zamašnjacima kojih obično ima dva, a jedan od njih služi i kao remenica. Radna površina čeljusti je ravna ili slabo zakrivljena, glatka ili rebrasta. Bokovi prostora za drobljenje zaštićeni su od pretjeranog habanja klinastim ulošcima od (austenitnog) manganskog čelika. Okvir i čeljusti velikih drobilica izrađeni su od više dijelova koji se

spajaju vijcima. Zijev Blakeove drobilice podešava se u manjoj mjeri klinovima između desne raspone ploče i okvira, a u većoj mjeri izmjenom rasponih ploča.

Dimenzije čeljusnih drobilica daju se uglavnom širinom (zijevom) i dužinom ždrijela. Te dvije dimenzije variraju u širokim granicama, obično od 175 x 250 do 1500 x 2000 mm, ali dosižu i 2000 x 3000 mm i više. Ispust Blakeove drobilice je promjenljiv, on je gotovo zatvoren kad su čeljusti u najbližem položaju a otvoren kad su najviše razmaknute. Širina ispusta iznosi 1/6 do 1/8 zijeva. Kut koji zatvaraju čeljusti u točkama gdje dodiruju zrna materijala zove se prihvatni kut. Kad su površine čeljusti ravne, prihvatni je kut svugdje jednak, a kad nisu prihvatni kut raste od ispusta prema gore. Što je manji prihvatni kut to je veći kapacitet drobilice, ali je stupanj drobljenja manji.

Nedostaci su da zrnatost izdrobljenog materijala nije jednolika. Pri drobljenju materijala koji se lomi pločasto i iverasto veličina najvećih čestica može biti i veća od zijeva. Zbog tarnog djelovanja čeljusti, u produktu ima mnogo praha. Nejednoličnost drobljenog materijala predstavlja nedostatak koji je ističe osobito ako je stupanj drobljenja veći od 5. Zbog toga je primjenljivost drobilica ovog tipa ograničena na grubo drobljenje, do veličine čestica oko 80 mm.

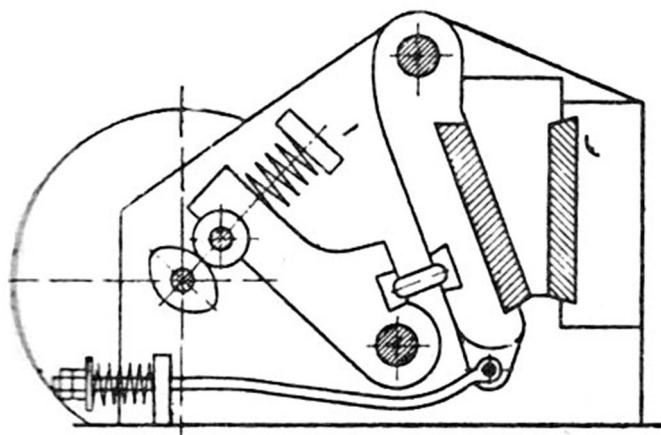


Slika 3. Čeljusna drobilica tipa Dodge

Kod čeljusne drobilice tipa Dodge njihajna osovina je premještena na donji dio pokretne čeljusti da bi se postigla veća ravnomjernost u veličini najvećih čestica u produktu. Širina ispusta je konstantna, a pokretna čeljust postiže svoju najveću amplitudu na samom ždrijelu.

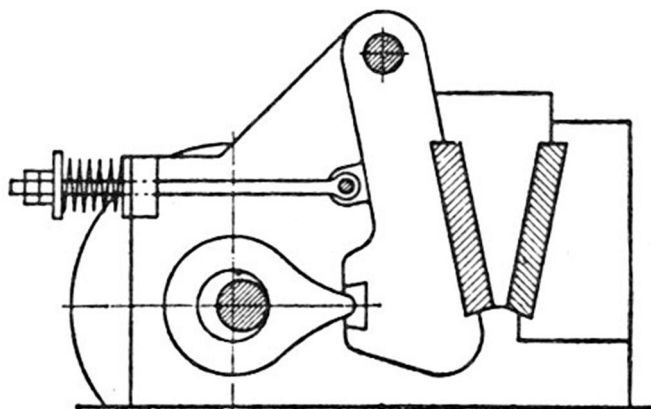
Nedostaci ovog tipa čeljusne drobilice su da zbog nepromjenjivog ispusta dolazi do začepjenja, prihvatni se kut smanjuje u fazi međusobnog približavanja čeljusti, a raspodjela sila na čeljusti također nije povoljna. Prednosti ovog tipa drobilice su što je djelotvornost mljevenja veća uslijed duljeg boravka materijala među čeljustima, a proizvod je ravnomjerniji po veličini i više kockasta oblika.

Osim dosad navedenih osnovnih oblika postoji još nekoliko tipova čeljusnih drobilica. Drobilice s jednom rasponom pločom razlikuju se od dosad opisanih po konstrukciji i po načinu rada. Pokretna čeljust je ekscentrično obješena neposredno za pogonsko vratilo, tako da ona preuzima ulogu glavne poluge, a otpada jedna raspona ploča. Čeljust sa svojim gornjim i donjim dijelom opisuje eliptičnu krivulju koja odozgo prema dolje postaje plosnatija, tako da čeljust u većoj mjeri djeluje trenjem i smikom. Zbog toga dolazi do povećanja udjela praha i sitnih čestica u produktu. Ispust se mijenja samo malo, pa se time povećava ravnomjernost veličine najvećih čestica. Nedostatak ovih drobilica je što su pogonsko vratilo i njegovi ležajevi jako opterećeni jer se reakcijske sile pokretne čeljusti neposredno prenose na nju, pa je habanje veće nego u drobilicama tipa Blake. Zato je kapacitet tih drobilica bio ograničen, najveći zijev dostizao je 600 mm a širina ispusta je varirala od 14 do 20 mm. Nakon primjene valjkastih ležajeva u glavi pokretne čeljusti, izvide se i velike drobilice s jednom rasponom pločom, sa ždrijelom dimenzija od 900 x 600 do 2000 x 1400 mm. Ove drobilice se upotrebljavaju također za srednje i fino drobljenje. Prihvatni kut može biti do 23°. Strojevi za fino drobljenje imaju izbočene čeljusti, tako da su u donjem dijelu paralelne. Time se povećava ravnomjernost najvećih čestica produkta.

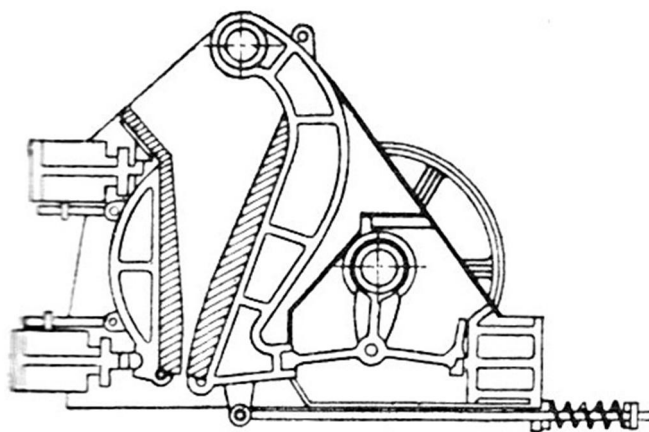


Slika 4. Čeljusna drobilica Tel Smith

Drobnica Telsmith umjesto raspone ploče ima vodoravnu ekscentričnu glavnu polugu, dok drobnica Sturtevant ima ekscentar pogonskog vratila elipsasta oblika i na njega se oslanja vrtilo koje prenosi impuls na polugu spoenu s pokretnom čeljusti. Zbog takve konstrukcije, drobnica Sturtevant drobi u toku jednog okretaja dvaput.

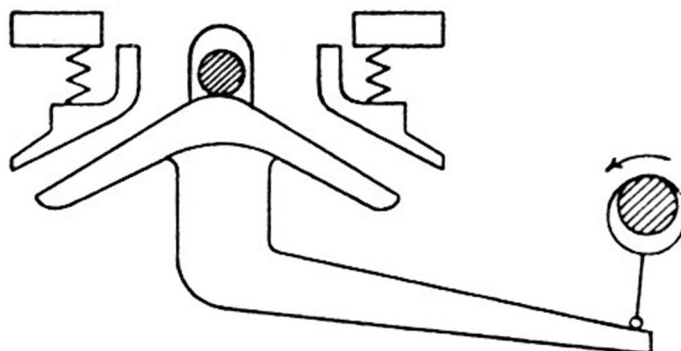


Slika 5. Čeljusna drobnica Sturtevant



Slika 6. Čeljusna drobnica Kue-Ken

Drobnica Kue-Ken u principu je slična tipu Blake, ali se od nje razlikuje po obliku ždrijela i položaju rasponih ploča. Izdrobljeni materijal ponekad ima ravnomjerniju zrnatost s obzirom na drobnicu tipa Blake.



Slika 7. Čeljusna drobilica Eimco-Fahremwald

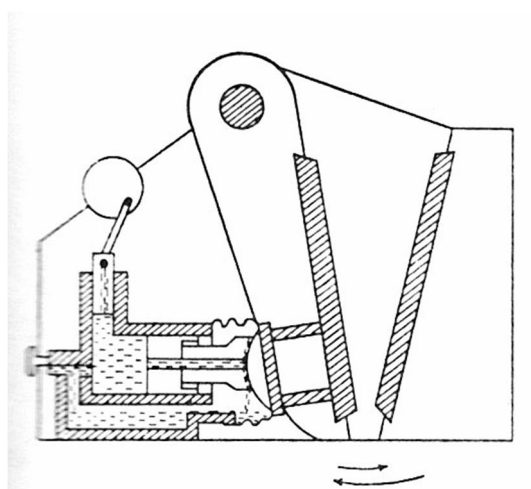
Droblilica Eimco-Fahremwald ima specijalnu konstrukciju. Kod nje su obje čeljusti pokretne i nisu okomite nego su koso postavljene. Elastično su vezane jakim oprugama koje omogućuju otvaranje ispusta u slučaju da u prostor za drobljenje upadne predmet koji nije moguće izdrobiti.

Pored svih nastojanja da se zamijeni drugim, prvobitni Blakeov princip koljenastog mehanizma pokretanja ostao je nenadmašen, i to zato što se njime postiže maksimum pritiska među čeljustima pri minimumu opterećenja rukavaca. Naravno da i on ima svojih nedostataka od kojih su glavni diskontinuirani rad, ograničenost brzine rada i relativno velika osjetljivost na lom. Čeljusne drobilice tipa zapravo Blake rade diskontinuirano. Na koristan rad drobljenja otpada samo pola njihova radnog vremena jer je vrijeme drobljenja ograničeno samo na polovinu trajanja okretaja pogonskog vratila. Pri radu tih drobilica vrijeme otvaranja jednako je vremenu zatvaranja čeljusti. Brzina zatvaranja čeljusti, tj. učestalost radnih pokreta, određena je i ograničena brzinom otvaranja čeljusti. Ta brzina predstavlja neizmjenljivu konstrukcijsku veličinu jer mora biti prilagođena brzini padanja materijala u prostoru među čeljustima. Zbog krutosti koljenastog mehanizma i velikih sila koje u njemu nastaju, neki se dio drobilice neizbježno mora slomiti ako među čeljusti upadne komad materijala koji se ne može izdrobiti ni de-formirati.

Budući da je raspone ploče najlakše zamijeniti, one su dimenzionirane tako da se slome prije nekog drugog dijela drobi-lice. Ponekad se jedna od rasponih ploča izvodi od dva dijela spojena svornjacima koji predstavljaju najslabiji dio konstrukcije. Kad se drobilica preoptereti, ti se svornjaci slome i stroj se može razmjerno brzo opet staviti u pogon nakon

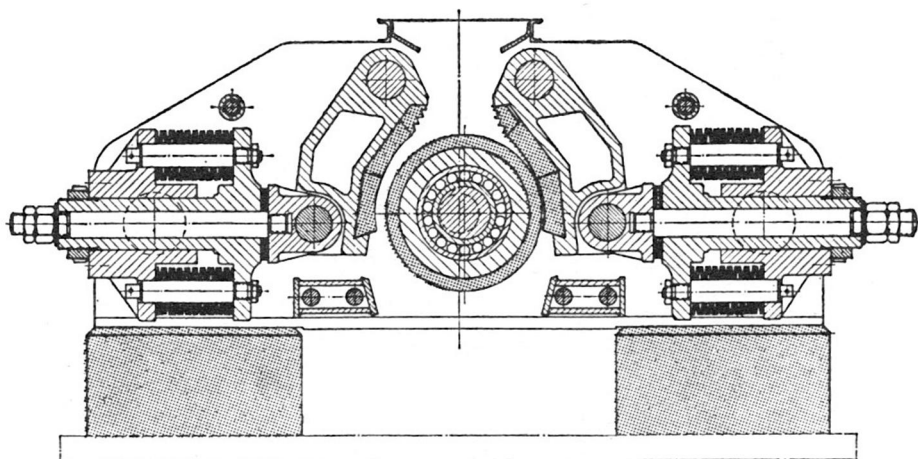
popravka ili zamjene raspone ploče. Ipak, vrijeme koje se time izgubi ide na štetu produktivnosti.

Nedostatak da je brzina rada drobilice ograničena jednakošću brzine otvaranja i zatvaranja čeljusti izbjegnut je konstrukcijom drobilice na principu tzv. hidrokinetičkog usitnjavanja. Kod čeljusne drobi-lice tipa Gaudie zbog hidrauličnog mehanizma, čeljusti se pri ulasku nedrobljivog predmeta elastično razmiču dok predmet ne ispadne iz drobilice, a osim toga se hidrauličnim pogonom postiže nesimetričan radni ciklus. Korisno vrijeme zatvaranja čeljusti znatno je skraćeno, a vrijeme otvaranja ostaje neizmijenjeno. Dok normalna čeljusna drobilica obavi dva radna ciklusa, drobilica Gaudie obavi tri, pa prema tome je teorijski učinak drobilice Gaudie za 50% veći.



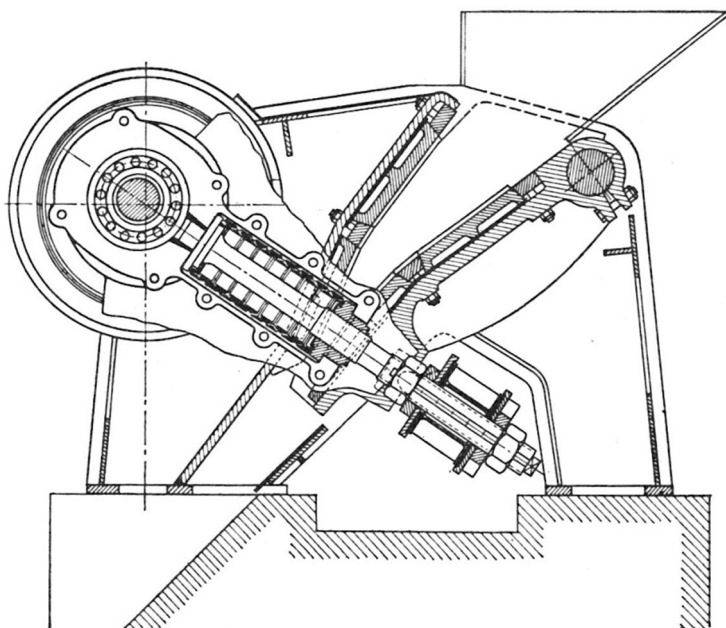
Slika 8. Čeljusna drobilica Gaudie

Sličnu konstrukciju ima drobilica Rotex koja se sastoji od ekscentričnog valjka koji se okreće između dviju čeljusti. Materijal se drobi između čeljusti i valjka koji osim rotacionog ima i njihajno kretanje.



Slika 9. Čeljusna drobilica Gaul Čeljusna drobilica Rotex

Postoji i udarna čeljusna drobilica kod koje su obje čeljusti jako nagnute i nisu okomite, a prostor za drobljenje je znatno produžen. Donja čeljust je pokretna a njen nagib raste u pravcu ispusta, što omogućuje ubrzanje drobljenja. Pokretna čeljust giba se puno brže nego kod normalnih čeljusnih drobilica. Ona oscilira toliko brzo da materijal prilikom njenog pokreta netrag ne pada na donju čeljust, pa ga kod sljedećeg pokreta naprijed, baca na nepokretnu gornju čeljust gdje se razbija udarcem.



Slika 10. Udarna čeljusna drobilica

Općenite prednosti čeljusnih drobilica su jednostavna niska konstrukcija, razmjerno malo habanje obloga čeljusti, laka izmjenljivost ishabanih dijelova, lako posluživanje koje ne zahtijeva kvalificiranu radnu snagu. Nedostaci su, osim već specifično spomenutih, potreba jakog temeljenja i opasnost od začepljivanja ispusta, zbog čega je potrebno što ravnomjernije dodavanje materijala za drobljenje.

3.2. Kružne drobilice

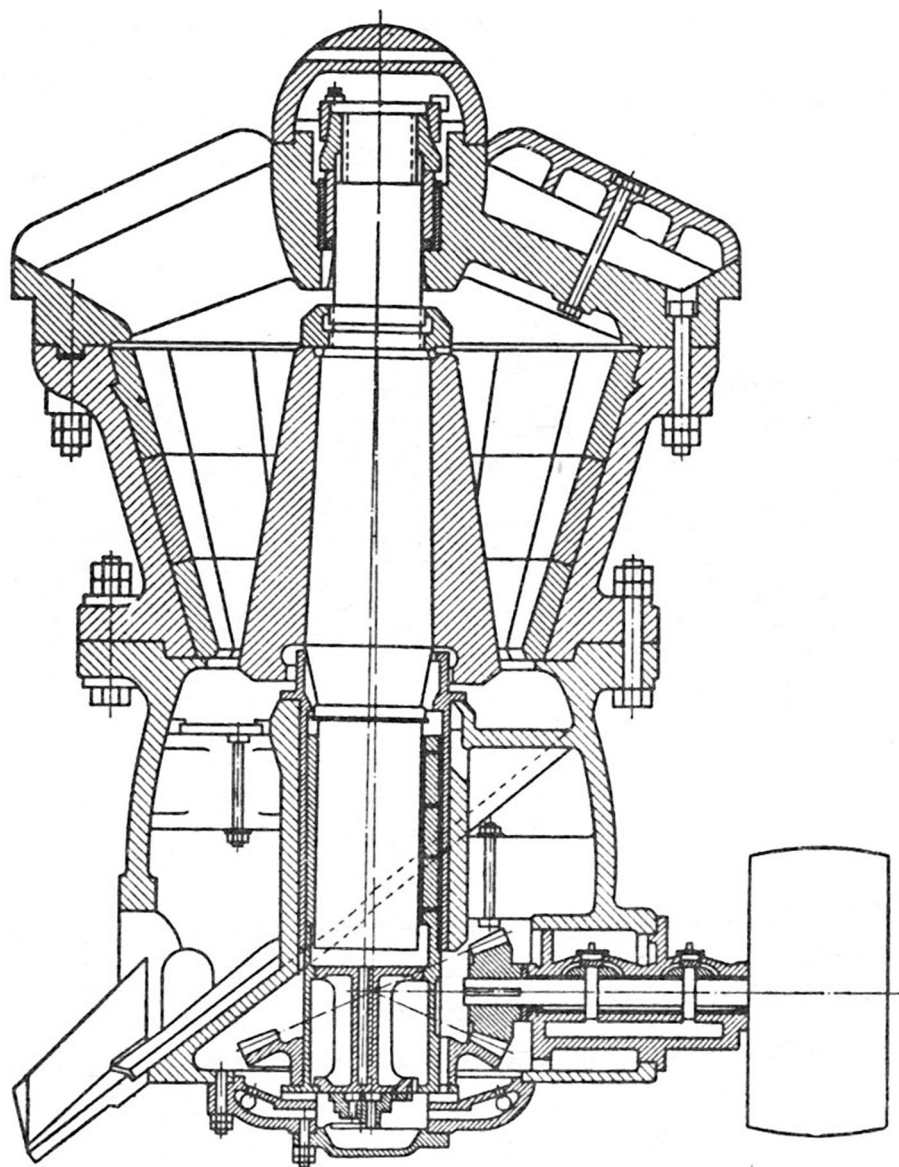
Kružne ili konusne drobilice se zovu tako zbog oblika kojeg imaju površine za drobljenje. U principu su to čeljusne drobilice kojima su obje površine za drobljenje, odnosno čeljusti, simetrično omotane oko vertikalne osi njihajne čeljusti.

U usporedbi sa čeljusnim drobilicama njihove su prednosti veliko povećanje ždrijela i zijeva i s tim vezano povećanje kapaciteta, neprekidan rad, znatno smanjenje masa na jedinicu učinka uslijed simetrične konstrukcije stroja, odgovarajuće smanjenje utroška energije.

Kružna drobilica se sastoji od dva uspravna odsječena konusa koji su ugrađeni jedan u drugi tako da su im vrhovi okrenuti u suprotnim pravcima. Vanjski je konus nepokretan, a unutrašnji je pričvršćen za ekscentrično pogonsko vratilo pa se s njim okreće. Pri tome se naizmjenično približava pojedinim točkama plašta nepokretnog konusa i od njih se udaljuje. Istovremeno se okreće oko svoje osi, i to pri praznom hodu u istom smjeru kao vratilo, a u suprotnom smjeru pri drobljenju materijala. Ovo okretanje u suprotnom smjeru po materijalu ovisi o broju okretaja tuljca vodilice na donjem rubu konusa i od donjeg promjera pokretnog konusa. U nekim drobilicama nema rotacije unutrašnjeg konusa oko vlastite osi. Oblik vanjskog konusa u nekim je tipovima izmijenjen. On može biti valjak kod tipa Telsmith ili je njegov vrh okrenut u isti pravac kao i vrh unutrašnjeg konusa, kao kod tipa Symons. I kružne drobilice uglavnom djeluju tako da drobe materijal gnječenjem kad se razmak obaju konusa smanjuje. Razlikuju se dva tipa drobilica upotrebljivanih za primarno drobljenje. To su tip McCully i tip Telsmith.

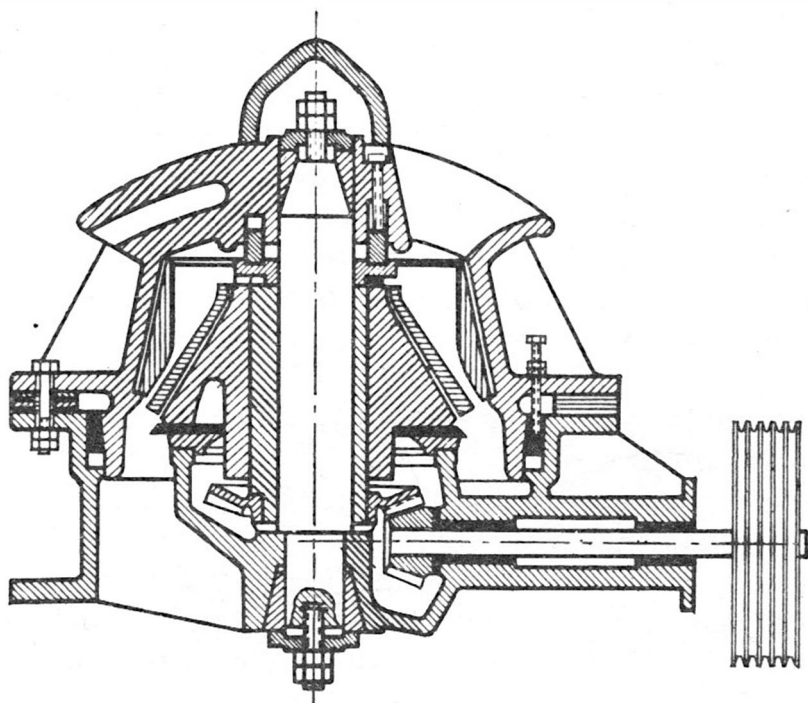
Droblilica McCully ima pokretni konus pričvršćen na okomitu osovinu, pri vrhu obješenu u ležajevima, a dolje usađenu u ekscentrični ležaj kojeg okreće glavno pogonsko vratilo preko konusnog zupčanika. Najveće promjene su udaljenosti između oba konusa na njihovom donjem kraju. Stroj radi po principu Blakeove čeljusne drobilice, što utječe i na zrnatost produkta. Kad je ždrijelo najviše otvoreno, kroz njega padaju i zrna koja su u jednom

ili u dva pravca veća od zijeva, ali zbog zakrivljenosti ždrijela taj nedostatak nije toliko značajan kao kod čeljusne drobilice. Drobilica McCully upotrebljava se za grubo i srednje drobljenje.



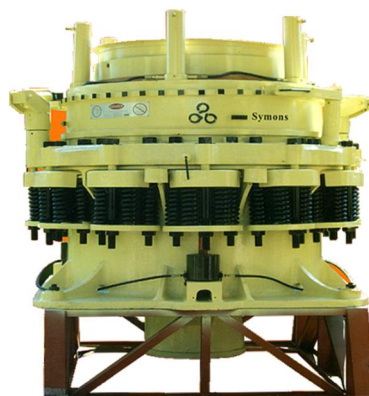
Slika 11. Kružna drobilica McCully

Kod drobilice Telsmith visina je smanjena na taj način što je glavna osovina na oba kraja pokretno učvršćena. Oko nje se okreće tuljac vodilica, a duž cijele visine pričvršćen je ekscentar na koji je navučen pokretni konus. Amplitude pri ekscentričnom kretanju konusa su jednake kod ždrijela i kod ispusta.



Slika 12. Kružna drobilica Telsmith

Droбилica Symons konstruktivno se razlikuje po izvedbi oba konusa, po većem ekscentricitetu i većem broju okretaja. Donja strana pokretnog konusa konstruirana je kao odsječak kugle, a sferično je izvedena i površina po kojoj konus kliže pri kotrljanju. Donji kraj osovine uglavljen je u ekscentričnom ležaju kao kod drobilice McCully. Plašt konusa ima veoma blagi pad, kut mu pri osnovici iznosi 40° . Isto tako je izveden i plašt nepokretnog dijela, u donjem dijelu su površine za drobljenje paralelne. Nepokretni konus je elastično pričvršćen za vanjsko kućište jakim oprugama kojih ima 20 do 80. Time se sprečavaju oštećenja u slučaju upadanja nedrobljivih predmeta u prostor za drobljenje.



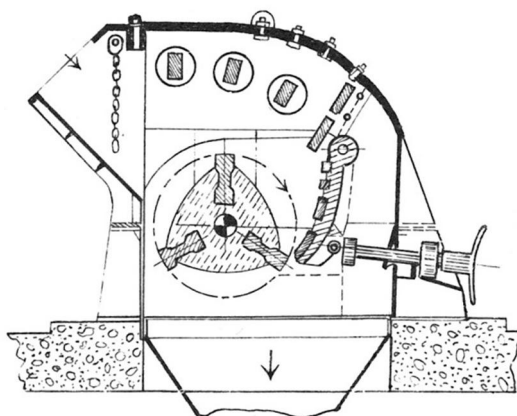
Slika 13. Kružna drobilica Symons

3.3. Udarne drobilice

Poslije Drugog svjetskog rata sve više ulaze u upotrebu udarne ili odbojne drobilice. One daju vrlo kvalitetan drobljenac i po obliku i po granulometrijskom sastavu. Imaju razmjerno veći utrošak energije i habajućih dijelova. Primjenjuju se uglavnom za sekundarno drobljenje ili predrobljavanje svih vrsta kamenih materijala u smislu njihova geološkog porijekla i fizičko-mehaničkih svojstava. Razmjerno su neekonomične pri drobljenju jako tvrdih, čvrstih te posebice abrazivnih kamenih materijala eruptivnog ili metamorfnog porijekla te dolomitiziranih sedimentnih stijena. U takvim slučajevima brzo i jako se troše i lome dijelovi koji neposredno drobe kamen.

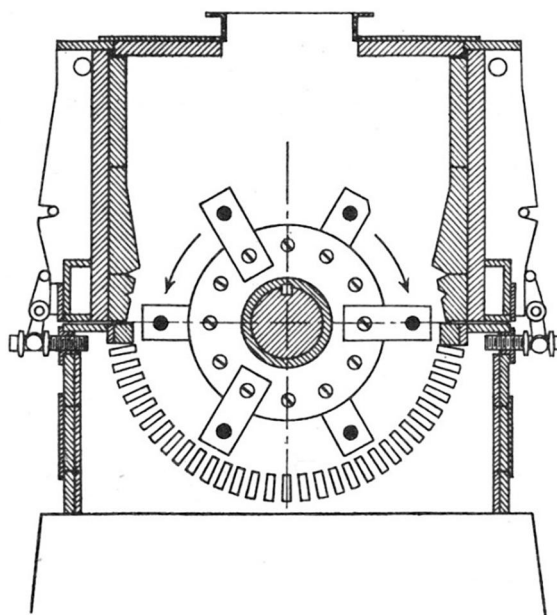
Osnovni dijelovi udarne drobilice su posebno oblikovani okretni dio, odnosno rotor i ploče statora. Drobljenje se odvija na način da rotor baca kamen na ploče statora gdje se razbija udarom. Dio drobljenca se odbija prema rotoru gdje se ponovo dalje usitnjava udarom rotora. Materijal je u dodiru s drobećim elementom samo na jednoj strani a nije uklješten. Pri tom udara ili drobeći element o zrno materijala ili obratno vrlo velikom brzinom. U oba se slučaja jedan dio kinetičke energije pretvara u rad usitnjavanja. Kvaliteta usitnjavanja se postiže regulacijom razmaka između rotora i ploča statora na način da se regulira sila udara kamenih komada na obloge ploča statora.

Obzirom na konstrukcijska obilježja rotor i statora udarne drobilice mogu biti s čvrstim udarnim gredama na rotoru ili s okretnim udarnim čekićima na rotoru, primjerice kao kod čekićara. Rotor se može okretati samo u jednom smjeru ili dvosmjerno. S obzirom na broj rotora, postoje jednostruke udarne drobilice, koje su najčešće u upotrebi ili dvostruke udarne drobilice.



Slika 14. Udarne drobilice

Čekičare su vrsta udarnih drobilica koje se koriste za drobljenje mekog do srednje-tvrdog, pa i žilavog materijala. Sastoje se od jednog ili dva rotora s čekićima različitog oblika koji se okreće velikom brzinom oko horizontalne osi u kućištu od čeličnih ploča. To je 300 do 400 min⁻¹ kod velikih jedinica i do 1500 min⁻¹ kod malih. Čekići su za rotor većinom pričvršćeni člankovito, a za vrijeme rada ih centrifugalna sila postavi radijalno. Pri dnu je obično ugrađeno sito koje se može izmijeniti, pa tako postoji mogućnost granulometrijskog podešavanja produkta. Čekičare djeluju na bazi udaraca koje materijal prima uzastopno u veoma kratkim intervalima, približno 150 udaraca na sekundu pri 1500 min⁻¹. Uslijed velike brzine, pritisci su u unutrašnjosti zrna veći nego kod sporohodnih strojeva, pa se zato u kružnim drobilicama mekani materijal eventualno samo deformira dok će u čekičarama od udarca postati krhak. Zato su čekičare pogodne i za drobljenje mekog materijala, primjerice gline.

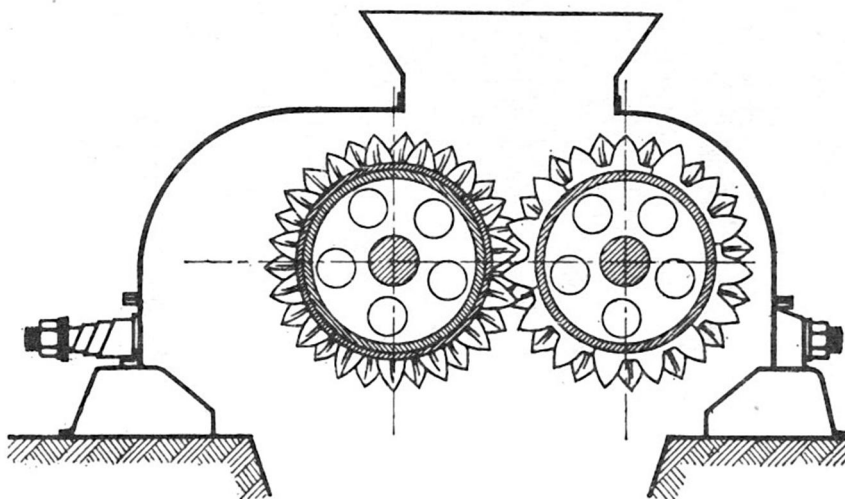


Slika 15. Čekičara

Posebna vrsta suvremenih udarnih drobilica su centrifugalne udarne drobilice ili mlinovi s uspravnom osi okretanja rotora. Služe za drobljenje krupnozrnih aluvijalnih kamenih materijala ili predrobljavanje prethodno drobljene krupnije kamene sitneži. Osnovno je obilježje ovih drobilica da se materijal drobi sam o sebe. Stoga se koriste, kao vrlo ekonomične u proizvodno-tehnološkom smislu, za predrobljavanje jako tvrde odnosno abrazivne kamene sitneži koja sadrži većoj mjeri silicij.

3.4. Drobilice s valjcima

Kod drobilica s valjcima razlikujemo drobilice s jednim do četiri valjka koji po obliku površine mogu biti glatki, nazubljeni i rebrasti. Ove drobilice sastoje se u načelu od dva valjka koji su pričvršćeni za paralelna vodoravna vratila i okreću se u suprotnom smjeru. Materijal dolazi odozgo, prolazi između valjka prema dolje i pri tome se drobi. Ako je materijal plastičan, primjerice glina, samo se izvalja. Obično se vrtilo jednog valjka okreće u čvrstim ležajima, a drugog u kliznim koji se opiru o jake opruge. Manje drobilice imaju pogon samo preko valjka u čvrstim ležajevima, a veće imaju motor za svaki valjak posebno. Obodne brzine valjaka su jednake ili se malo razlikuju. Kod nejednakih brzina materijal je više izložen silama trenja i smičnom opterećenju. Donja granica drobljenja iznosi 1 do 2 mm, a stupanj drobljenja oko 4. Ako je potrebno, stupanj drobljenja se može povećati povećanjem obodne brzine na više od 12 m/s, dok je normalna obodna brzina između 2 i 8 m/s, iznimno 12 m/s. Ove drobilice imaju široku primjenu jer su sigurne, jednostavne i neosjetljive.



Slika 16. Valjkasta drobilica s nazubljenim valjcima

4. KONCEPCIJSKA RJEŠENJA

4.1. Lista zahtjeva, funkcijska dekompozicija, morfološka matrica i koncepti

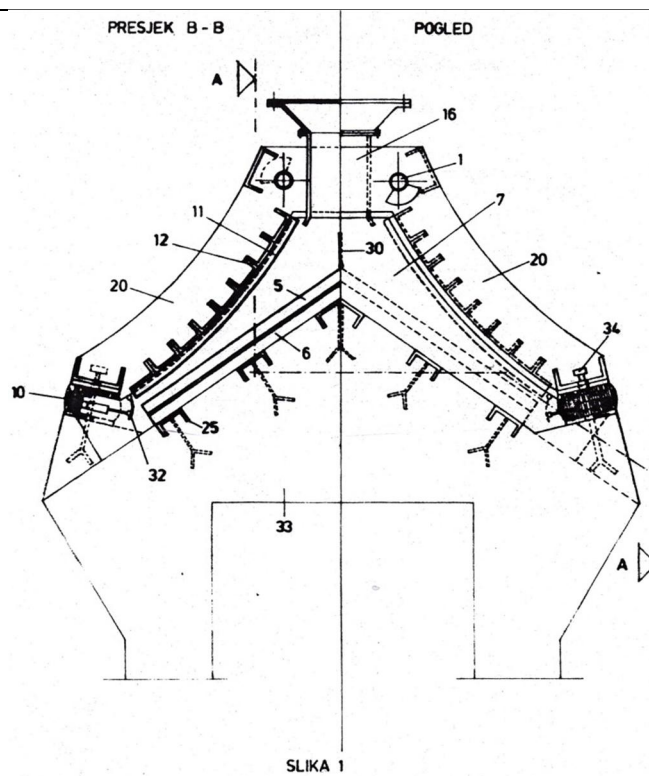
Na početku ovog koraka potrebno je prikazati listu zahtjeva, izraditi funkcijsku dekompoziciju vibracijske drobilice kamena, a zatim iz morfološke matrice generirati koncepte te ih ocijeniti i izabrati najbolji za projektne zahtjeve.

Projektne zahtjevi navedeni su u listi zahtjeva:

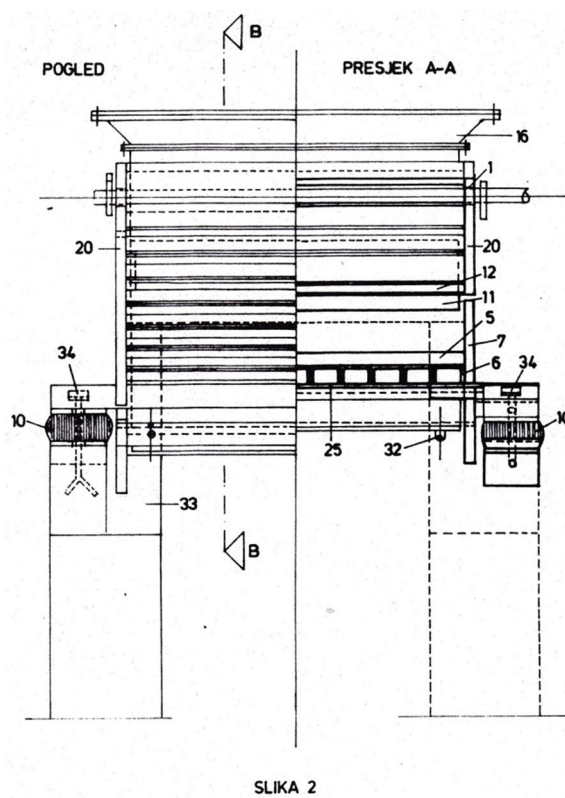
FSB Zagreb		LISTA ZAHTJEVA Vibracijska drobilica za kamen	Strana:
Naručilac			List: 1
Promjena	Z Ž	Zahtjevi	Odgovoran
		GEOMETRIJA	
	z	Granulacija kamena ulaz/izlaz iznosi: 220/80 mm.	
	z	Sirine radnih ploha trebaju iznositi 1600 mm.	
	z	Radna ploha donjih udarnih tijela je ravnina.	
	z	Kut nagiba donjih radnih ploha iznosi 35° prema horizontali.	
	z	Radna ploha gornjih udarnih tijela je izlomljena konveksna ravnina u trakama koje su u presjeku poredane kao sekante parabole. Parabola ima veću zakrivljenost u gornjem dijelu.	
	ž	Treba planirati 5 - 6 traka na dužini od oko 1200 mm.	
	z	Gornja i donja udarna tijela su pravokutne ploče.	
		KINEMATIKA	
	z	Radni okvir treba vibrirati frekvencijom 950 - 1000 titraja/min.	
	z	Amplituda iznosi 14 do maksimalno 20 mm.	
	z	Treba omogućiti sužavanje i širenje izlaznog otvora sa prigušivačima u toku rada drobilice.	
		SILE	
	z	Gornja i donja udarna tijela su pričvršćena vijcima za odgovarajuće radne okvire.	
	ž	Masa gornjeg radnog okvira sa udarnim tijelima treba iznositi oko 4000 kg.	

FSB Zagreb		LISTA ZAHTJEVA Vibracijska drobilica za kamen	Strana:
Naručilac			List: 2
Promjena	Z Ž	Zahtjevi	Odgovoran
		MATERIJAL	
	Z	Gornja i donja udarna tijela su lijevana od manganskog čelika.	
		ENERGIJA	
	Z	Pogonska energija je električna 3x400 V	
		ERGONOMIJA I SIGURNOST	
	Z	Potrebno je predvidjeti sigurnosne uređaje.	
		EKSPLOATACIJA I ODRZAVANJE	
	Z	Sva udarna tijela su jednaka i tako konstruirana da se mogu premještati i zakretati.	
	Z	Mase udarnih tijela trebaju biti tako odabrane da ih mogu montirati dva radnika.	
	Ž	Treba omogućiti nadizanje gornjeg radnog okvira radi montaže i demontaže bočnih kosnika i gumenih odbojnika.	
	Ž	Treba predvidjeti laganu izmjenu cilindričnih umetaka za fino balansiranje.	
	Ž	Potrebno je predvidjeti i povremeno nadizanje donjeg radnog okvira radi zamjene elastomernih ležajeva.	
	Ž	Masa gornjeg radnog okvira sa udarnim tijelima treba iznositi oko 4000 kg.	

Skice iz spisa na temelju kojih je potrebno projektirati i konstrukcijski oblikovati vibracijsku drobilicu kamena:



Slika 17. Skica 1 iz spisa



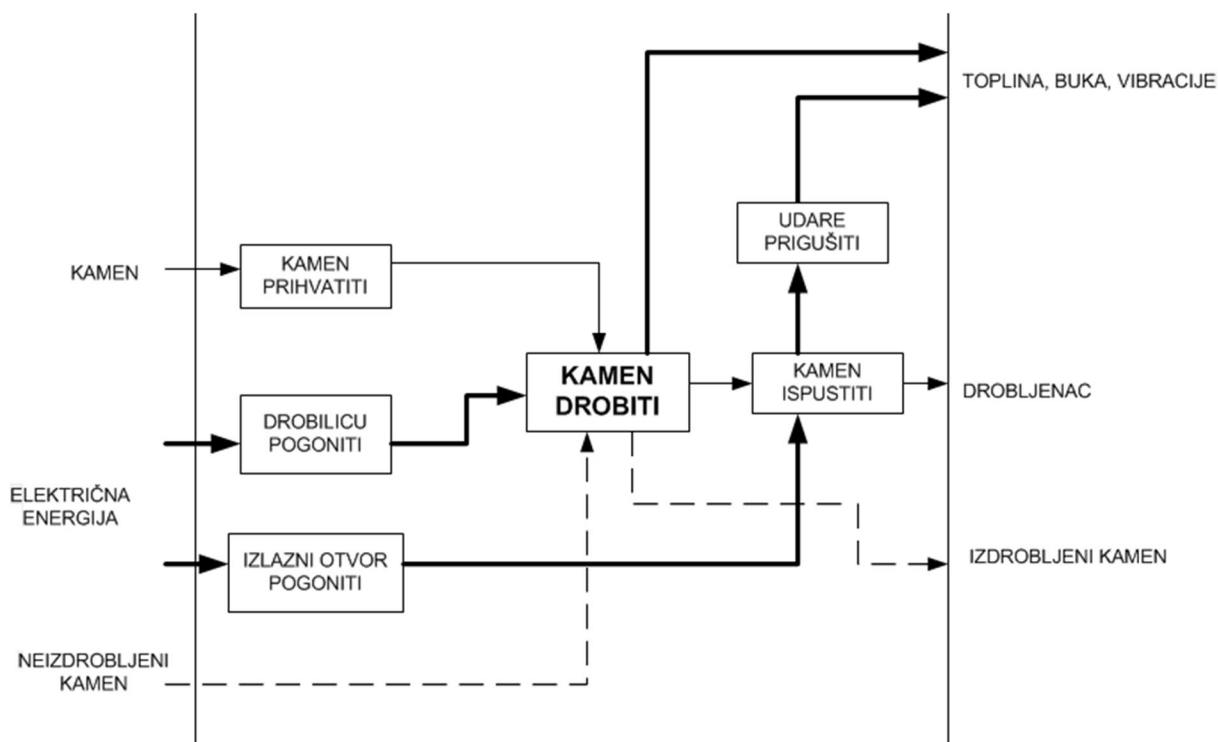
Slika 18. Skica 2 iz spisa

Ukupna funkcija stroja prikazana je pomoću „black box“ modela. Debele linije predstavljaju tok energije, tanke linije su vezane za materijal, a isprekidane za informaciju. Važno je uočiti razliku između kamena kao materijala i njegovog stanja kao informacije.



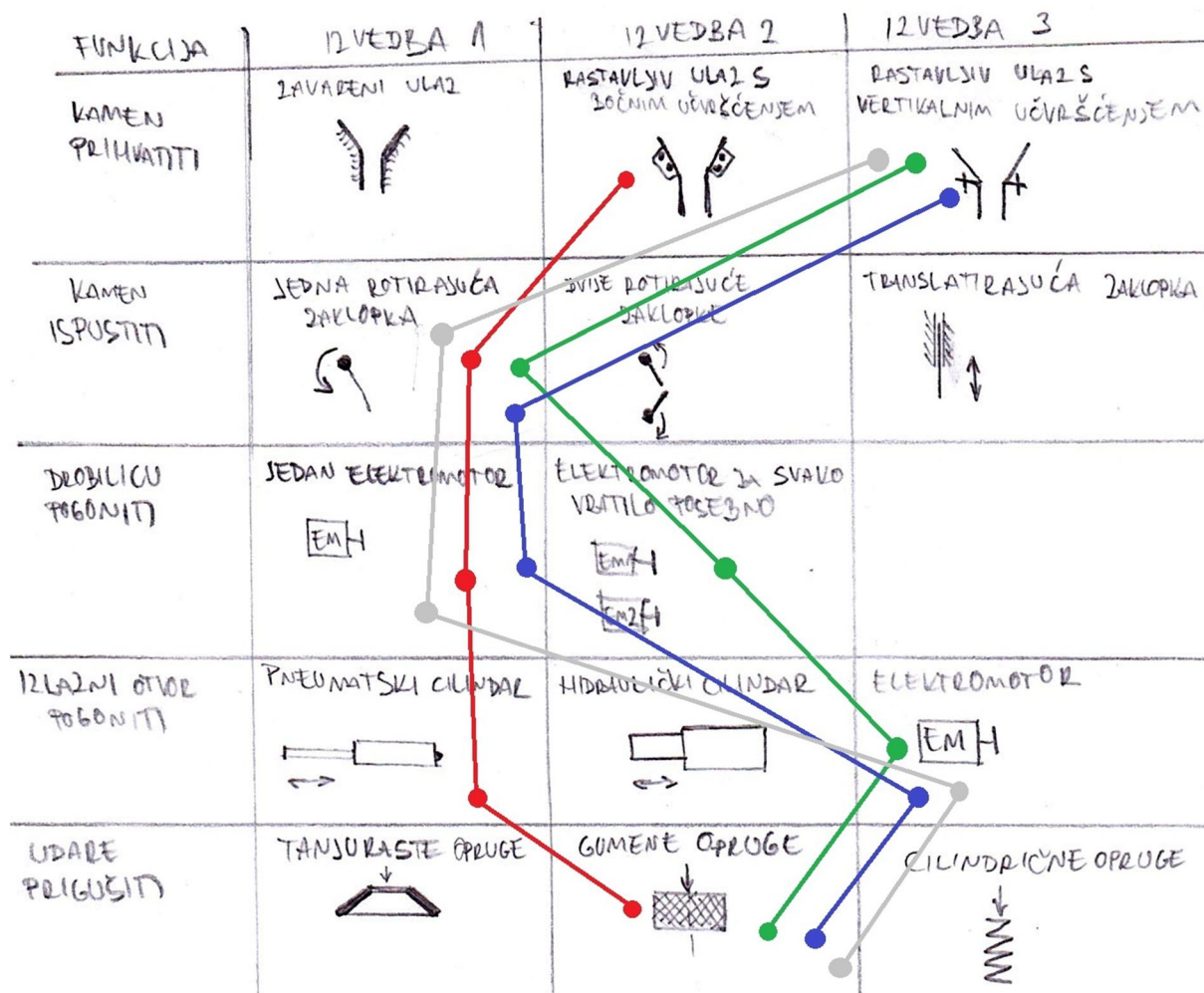
Slika 19. Ukupna funkcija stroja

Isti način označavanja linija nalazi se i u funkcijskoj dekompoziciji (debelo – energija, tanko – materijal, isprekidano – informacija). Funkcijska dekompozicija vibracijske drobilice kamena izrađena je na način da pojedine funkcije smisleno odgovaraju određenom (pod)sklopu drobilice:



Slika 20. Funkcijska dekompozicija vibracijske drobilice kamena

Morfološka matrica:



Slika 21. Morfološka matrica i generiranje koncepata

Boje linija koje se odnose na izbor određenog koncepta označene su na slijedeći način:

- koncept 1 - crveno,
- koncept 2 - zeleno,
- koncept 3 - plavo,
- koncept 4 - sivo.

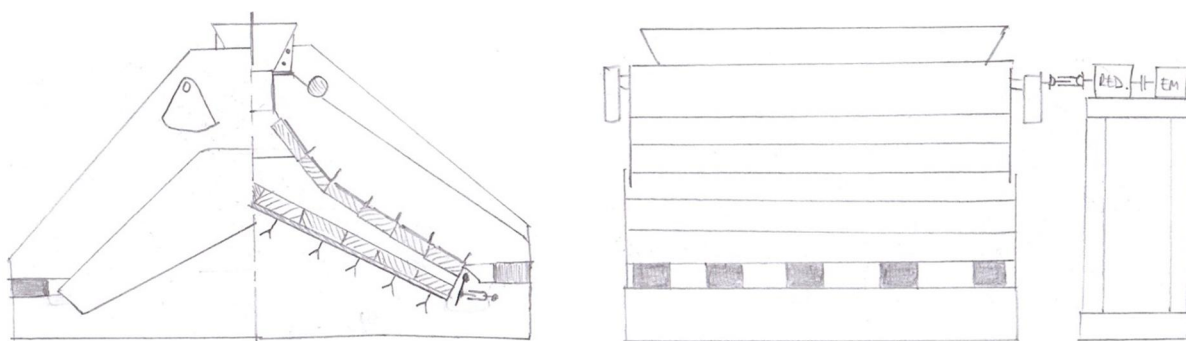
Važno je istaknuti da u morfološku matricu nije uvrštena funkcija „kamen drobiti“ budući da je ona unaprijed već bila jasno definirana u idejnim nacrtima, odnosno skicama iz spisa i nalazi se u početnim projektnim zahtjevima gdje je ona određena na gornji okvir drobilice.

Budući da je u međuvremenu došlo do promjene, odnosno do poopćavanja projektnih zahtjeva glede te točke, napravljen je i četvrti koncept koji se od ostalih razlikuje upravo po tome da je funkcija koja se odnosi na drobljenje kamena smještena na donji okvir, što obavezno treba uzeti u obzir kod čitanja morfološke matrice.

4.2. Opis i ocjenjivanje koncepata

Pri izboru koncepata pazilo se da zadovoljavaju sve projektne zahtjeve i izbjegnute su takve kombinacije kojima bi se automatski eliminiralo određeni koncept zbog neispunjavanja istih.

Koncept 1:



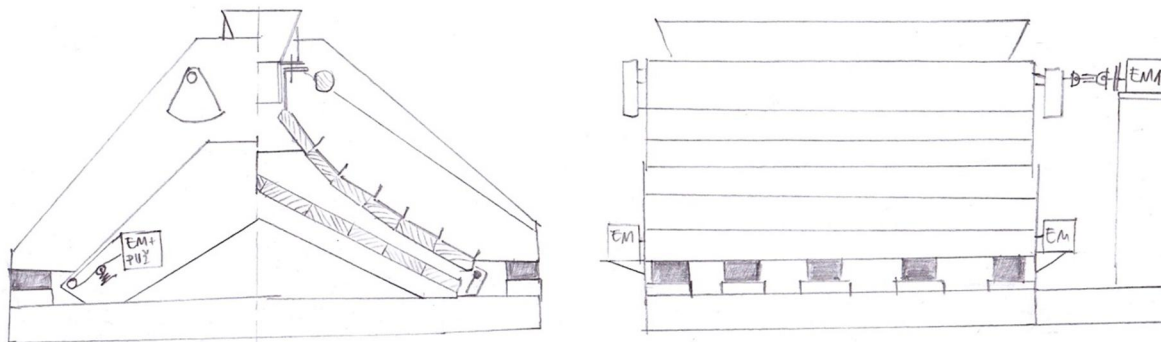
Slika 22. Koncept 1

Na betonskom postolju nalazi se konstrukcija s donjim udarnim pločama. Gornji radni okvir spojen je oprugama za postolje. Na gornjem radnom okviru nalaze se vratila i dio za prihvat kamena koji je vijcima spojen za bočne strane okvira. Na postolju nalaze se pneumatski cilindri koji reguliraju otvor za izlaz kamena. Elektromotor preko spojke pokreće reduktor koji prenosi okretni moment na kardanska vratila s mogućnošću pomaka, a ona dalje na pogonska vratila s utezima.

Glavne prednosti ovog koncepta su relativno manji broj dijelova (nema remenskog prijenosa s obzirom na treći koncept), te povoljno opterećenje opruga. Neki od nedostataka su da donji okvir ne prigušuje udare, smještaj pneumatskih cilindara, te problem ako u radu se više kamena nađe na jednoj strani drobilice. Još jedan problem predstavlja i učvršćenje dijela

za prihvat kamena zbog nepovoljnog opterećenja vijaka ili potrebe za korištenjem dosjednih vijaka u tankoj ploči.

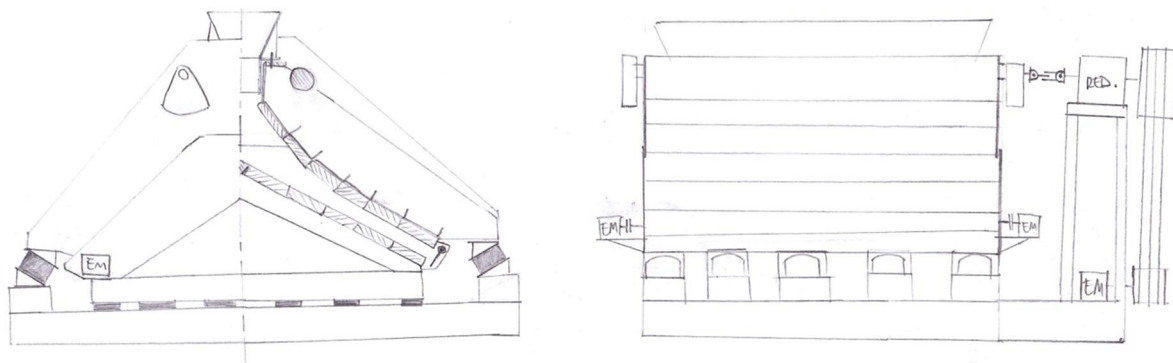
Koncept 2:



Slika 23. Koncept 2

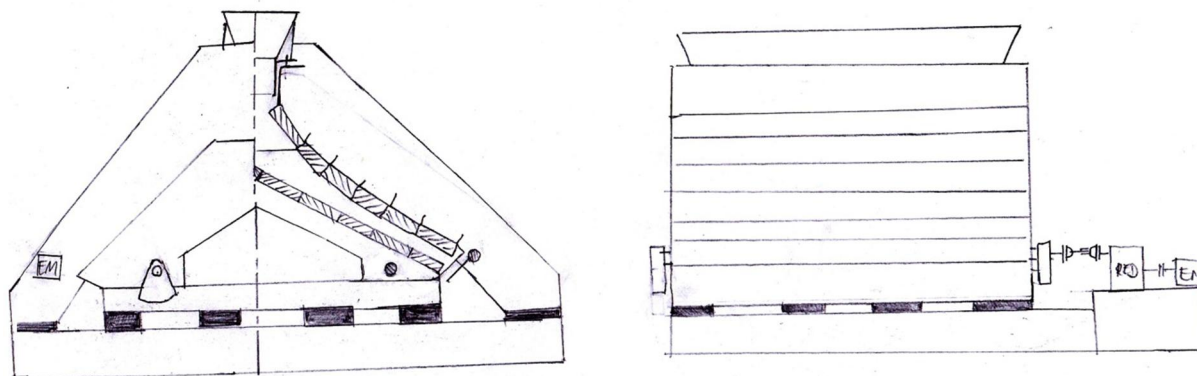
Na postolju od čeličnih profila nalazi se zavarena konstrukcija donjeg okvira sa udarnim pločama. Gornji okvir je preko gumenih opruga spojen na postolje. Na gornjem radnom okviru nalaze se vratila i dio za prihvat kamena koji je za gornji radni okvir spojen vijkima u vertikalnom položaju. Na postolju se nalazi sklop elektromotora (po potrebi s reduktorom, odnosno pužnim prijenosnikom) koji preko lanca regulira otvor za izlaz kamena. Zatezni lančanik osigurava prigušenje udara. Svako pogonsko vratilo drobilice pokreće zaseban elektromotor (po potrebi s reduktorom) koji je preko spojke vezan za kardanska vratila s mogućnošću pomaka, a ona na pogonska.

Glavne prednosti ovog koncepta su također relativno manji broj dijelova pogonskog sustava s obzirom na treći koncept, međutim to je relativno jer imamo dva pogonska elektromotora. Prednost je i povoljno opterećenje gumenih opruga, te povoljno opterećenje vijaka kod dijela za prihvat kamena. Nedostaci su da donji okvir također ne prigušuje udare, te problem ako se u radu više kamena nađe na jednoj strani drobilice. Možda najveći problem predstavlja sinkronizacija rada elektromotora koji pokreću pogonska vratila, da bi se osiguralo djelovanje sile isključivo u vertikalnom smjeru.

Koncept 3:**Slika 24. Koncept 3**

Na postolje od čeličnih profila pričvršćen je donji radni okvir s tvrdim gumenim oprugama. Za postolje je preko nosača za gumene opruge vezan gornji radni okvir na kojemu se nalaze pogonska vratila i dio za prihvat kamena. Dio za prihvat kamena spojen je vijcima za konstrukciju gornjeg okvira u vertikalnom smjeru. Na donjem radnom okviru nalazi se elektromotor koji regulira otvor za izlaz kamena. On je na vratilo spojen preko elastične spojke koja služi za prigušenje udara. Elektromotor za pogon drobilice preko remenskog prijenosa i reduktora pokreće pogonska vratila drobilice koja su na izlazna vratila reduktora spojena kardanskim vratilima s mogućnošću pomaka.

Glavne prednosti ovog koncepta su prigušenje udara i vibracija donjeg radnog okvira zbog tvrdih gumenih opruga između njega i postolja (koje ostali koncepti nemaju već je donji okvir kruto spojen za postolje ili izveden skupa s njim), te osiguranje pomoću elastičnosti remenskog prijenosa, povoljno opterećenje vijaka dijela za prihvat kamena, najmanje dijelova mehanizma za pokretanje izlaznog otvora, te sigurnost zbog mogućih bočnih udara u toku rada drobilice ako se više kamena nađe na jednoj strani (tvrde gumene opruge donjeg okvira i koso postavljene opruge gornjeg okvira). Nedostaci ovog koncepta su veći broj dijelova pogonskog mehanizma i relativno nepovoljno opterećenje gumenih opruga gornjeg okvira (50% smik), budući da gumene opruge mogu preuzeti puno veću silu u smjeru osi (tlak - vlak), nego smičnu silu.

Koncept 4:**Slika 25. Koncept 4**

Na postolju od čeličnih profila nalazi se konstrukcija donjeg okvira sa udarnim pločama. Na postolje povezana je preko gumenih opruga. Za razliku od ostalih koncepata, ovdje je donji okvir radni, a gornji je fiksni. Gornji okvir je preko tvrdih tankih gumenih opruga spojen na postolje zbog prigušenja udara. Na gornjem okviru nalazi se dio za prihvata kamena koji je za njega spojen vijcima u vertikalnom položaju. Na gornjem okviru s obje strane nalazi se i elektromotor koji preko elastične spojke regulira izlaz kamena. Pogonski elektromotor preko spojke pokreće reduktor koji prenosi okretni moment na kardanska vratila s mogućnošću pomaka, a ona dalje na pogonska vratila s utezima, koja se u ovom slučaju nalaze na donjem okviru.

Glavne prednosti ovog koncepta su relativno manji broj dijelova (nema remenskog prijenosa s obzirom na treći koncept, manje dijelova sustava za regulaciju izlaznog otvora), povoljno opterećenje opruga, te prigušenje udara fiksnog okvira, u ovom slučaju, gornjeg. Iako, kao što će se vidjeti u sljedećoj tablici, ovaj koncept grubo gledajući pozitivne i negativne strane stoji vrlo dobro, veliki problem nalazi se u činjenici da je ovdje radni okvir smješten dolje. Za takav koncept potrebne su veće sile i dimenzije jer na donji radni okvir pada kamen, te on mora svladati svoju težinu i cjelokupnu težinu materijala i odbaciti ga u gornji okvir da bi se drobio, dok ostali koncepti drobe težinom gornjeg okvira, kojem još pomaže i gravitacija, dok u ovom slučaju odmaže. Problem je i veliko smično i nestabilno opterećenje opruga ako se više materijala nađe na jednoj stani drobilice u toku rada.

Ocjenjivanje i izbor koncepta prema kojem će biti izvršeno projektiranje drobilice:

	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4
Prihvat kamena	-	+	+	+
Pogon drobilice	+/-	+/-	+/-	-
Pogon izl. otvora	-	+/-	+	+
Prigušenje udara	-	-	+	+
Ispust kamena	+	+	+	+
Sigurnost	+/-	+/-	+/-	+/-
Otpornost trošenju	+/-	+/-	+/-	+/-
Održavanje	+/-	+/-	+/-	+/-
Ukupno +	+1	+2	+4	+4
Ukupno -	-3	-1	-0	-1
Zbroj ocjena	-2	+1	+4	+3

Tablica 1. Ocjenjivanje koncepata

U prethodnoj tablici izvršeno je jednostavno binarno vrednovanje i usporedba karakteristika drobilice koje se odnose na konstrukciju i neka svojstva u eksploataciji. Prema navedenim kriterijima ispada da je najbolji treći koncept, pa će on biti razrađen u sljedećem poglavlju koje se odnosi na projektiranje.

5. PROJEKTIRANJE

Cilj ovog rada je projektirati i konstrukcijski oblikovati vibracijski stroj za usitnjavanje kamena koji radi na temelju patentnog spisa, odnosno skice. Potrebno je odabrati projektne parametre iz priloženih materijala uzimanjem u obzir kapaciteta, granulacije kamena na ulazu i izlazu, snagu pogonskog stroja, vrstu pogonske energije, sigurnosne uređaje. Ostali zahtjevi su navedeni na početku prošlog poglavlja.

5.1. Proračun

Važno je naglasiti da se u nekim slučajevima prilikom proračuna više stvari paralelno računalo i modeliralo jer jedna stvar ovisi o drugoj, o njoj izvedbi, konstrukciji i/ili parametrima i/ili bile su potrebne procijene bilo dimenzija, bilo mase određenog dijela kojeg je moguće definirati tek kasnije. Često se vraćalo nekoliko koraka unazad i računalo ispočetka. Zato će u pojedinim dijelovima proračuna biti naglašeno kako su izračunati ti dijelovi. Također, nakon što je određen strojni dio u cijelosti konačno definiran svojim dimenzijama i geometrijom izvršena je provjera (u slučaju da je prije definiranja dijela bila potrebna procjena nekog parametra, primjerice mase zbog izračuna dinamičkih momenata inercije ili razmaka osi vratila kod remenskog prijenosa) odgovaraju li prethodno procijenjeni parametri konačnim parametrima, te po potrebi izvršena je korekcija i ponovljen proračun.

5.1.1. Pogonski motor

Potrebna snaga elektromotora izračunata je iz dinamičkih momenata inercije dijelova stroja, točnije snage u sustavu, koja je predstavljena na taj način. Dinamički momenti inercije su izračunati iz njihovih masa na temelju osnovnih geometrijskih oblika i dimenzija (procjene izgleda konačnog oblika strojnog dijela), prethodno modelirani u programu Pro/ENGINEER.

Dinamički moment inercije svih utega za balansiranje:

$$I_{ut,uk} = 4 \cdot m \cdot r^2 = 4 \cdot 40 \cdot 0,11^2 = 1,936 \text{ kgm}^2$$

Dinamički moment inercije svih pogonskih vratila:

$$I_{v,uk} = m_v \cdot r_v^2 = 177,563 \cdot 0,06^2 = 0,639 \text{ kgm}^2$$

Dinamički moment inercije kardanskih vratila:

$$I_{k,uk} \approx 0,1 \text{ kgm}^2$$

Dinamički moment inercije masa u reduktoru:

$$I_{red} \approx 0,5 \text{ kgm}^2$$

Dinamički moment inercije remenskog prijenosa (2 remenice):

$$I_{RP} \approx 4 \text{ kgm}^2$$

Ukupni dinamički moment inercije:

$$I_{uk} = I_{ut,uk} + I_{v,uk} + I_{k,uk} + I_{red} + I_{rp} = 1,936 + 0,639 + 0,1 + 0,5 + 4 = 7,175 \text{ kgm}^2$$

Vrijeme puštanja stroja u rad (odabrano):

$$t = 5 \text{ s}$$

Ubrzanje:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t}$$

Zadan broj titraja gornjeg radnog okvira ujedno definira i broj okretaja pogonskog vratila.

$$n_v = 1000 \text{ min}^{-1}$$

$$\omega = \frac{n\pi}{30} = \frac{1000\pi}{30} = 104,720 \text{ s}^{-1}$$

$$\varepsilon = \frac{104,720}{5} = 20,944 \text{ s}^{-2}$$

Iz toga slijedi potreban moment i snaga:

$$T = I_{uk} \cdot \varepsilon = 7,175 \cdot 20,944 = 150,273 \text{ Nm}$$

$$P = T \cdot \omega = 150,273 \cdot 104,720 = 15,737 \text{ kW}$$

Iskoristivosti pojedinih dijelova stroja:

Ležajevi:

$$\eta_L = 0,99$$

Kardansko vratilo:

$$\eta_k = 0,98$$

Reduktor:

$$\eta_{red} = 0,8$$

Remenski prijenos:

$$\eta_{RP} = 0,95$$

Ukupna iskoristivost:

$$\eta_{uk} = \eta_L^2 \cdot \eta_k^2 \cdot \eta_{red} \cdot \eta_{RP} = 0,99^2 \cdot 0,98^2 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 0,71$$

Potrebna snaga elektromotra iznosi:

$$P_{EM,potr} \geq \frac{P}{\eta_{uk}} = \frac{15,737}{0,71} = 22,165 \text{ kW}$$

Odabran je četveropolni asinkroni elektromotor tvrtke Lenze oznake MHERAXX200-32V1C sljedećih karakteristika (ostali podaci dostupni na [16.]).

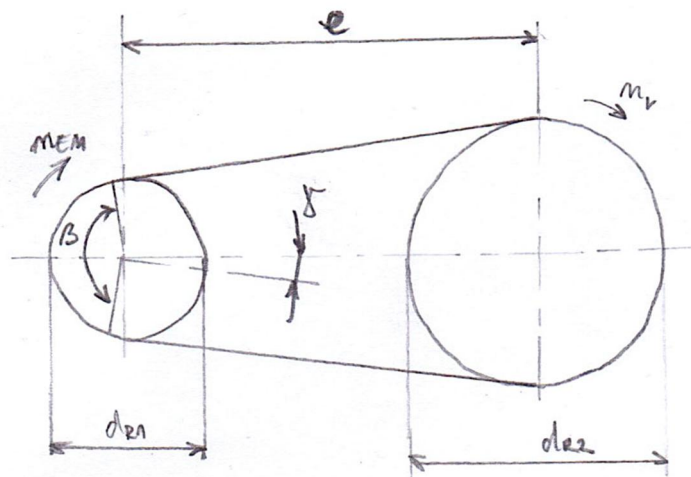
$$P_{EM} = 30 \text{ kW}$$

$$n_{EM} = 1470 \text{ min}^{-1}$$

$$M_{EM} = 195 \text{ Nm}$$

5.1.2. Remenski prijenos

Proračun remenskog prijenosa napravljen je prema normi DIN 7753 koja se primjenjuje i na uske i na normalne klinaste remene (prema [8.], str. 359, dodatna provjera izvršena i u literaturi [20.]).



Slika 26. Skica za proračun remenskog prijenosa

Potreban prijenosni omjer da bi se osigurao broj okretaja pogonskog vratila prema projektnim zahtjevima:

$$i = \frac{n_{EM}}{n_v} = \frac{1470}{1000} = 1,47$$

Budući da je optimalna brzina klinastog remena na kojoj on prenosi najveću snagu oko 20 m/s, izračunat je aktivni promjer pogonske remenice koji odgovara toj brzini:

$$d_{R1} = \frac{v}{n \cdot \pi} = \frac{20}{\frac{1470}{60} \cdot \pi} = 260 \text{ mm}$$

Odabir promjera veće remenice:

$$d_{R2} = d_{R1} \cdot i = 260 \cdot 1,47 = 382,2 \text{ mm}$$

Za veću remenicu odabran je promjer 383 mm, što znači da stvarni prijenosni omjer sada iznosi:

$$i_{RP} = \frac{d_{R2}}{d_{R1}} = \frac{383}{260} = 1,473$$

pa je točna brzina pogonskog vratila drobilice:

$$n_v = \frac{n_{EM}}{i_{RP}} = \frac{1470}{1,473} = 997,963 \text{ min}^{-1}$$

Prema [8.], str. 363, i [21.] izabran normalni klinasti remen 25x3700 DIN 2215, budući da je to najveći profil remena koji zadovoljava uvjet mm.

Razmak osi vratila (iz konstrukcije):

$$e = 1160 \text{ mm}$$

Obuhvatni kut manje remenice:

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{d_2 - d_1}{2e} = \frac{383 - 260}{2 \cdot 1160} = 0,106$$

$$\frac{\beta}{2} = 83,915^\circ$$

$$\beta = 167,83^\circ$$

Kut nagiba vučnog i slobodnog ogranka remena:

$$\gamma = 90^\circ - \frac{\beta}{2} = 90 - 83,915 = 6,085^\circ$$

Aktivna duljina klinastog remena:

$$L_a = 2e \cdot \sin \frac{\beta}{2} + \frac{\pi}{2} (d_2 + d_1) + \frac{\gamma}{2} (d_2 - d_1)$$

$$L_a = 2 \cdot 1160 \cdot \sin 83,915 + \frac{\pi}{2} (383 + 260) + \frac{6,085}{2} (383 - 260) = 3691,178 \text{ mm}$$

Potreban broj klinastih remena:

$$z = \frac{P_{EM} \cdot c_2}{P_N \cdot c_1 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5}$$

Iz [8.], stranice 363-367, izvađeni su sljedeći potrebni podaci:

$$P_N = 6,1 \text{ kW}$$

$$c_1 = 0,97$$

$$c_2 = 1,3$$

$$c_3 = 1$$

$$c_4 = 1$$

$$c_5 = 1$$

$$z = \frac{30 \cdot 1,3}{7,9 \cdot 0,97 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1} = 5,08 = 6 \text{ klinastih remena}$$

Učestalost savijanja:

$$f_f = v \cdot \frac{Z}{L_a}$$

$Z = 2$ - broj remenica u pogonu

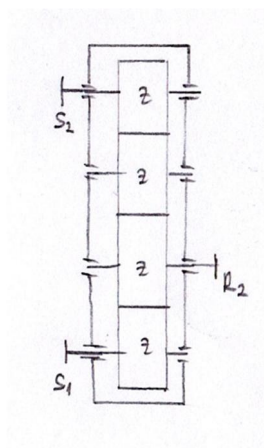
$$f_f = 20 \cdot \frac{2}{3691,178} = 0,0108 \text{ s}^{-1} \leq 30 \text{ s}^{-1}$$

ZADOVOLJAVA

5.1.3. Prijenosnik

Prijenosnik je u dosadašnjem proračunu vođen pod kraticom (oznakama) „red“ za reduktor, no on ne reducira niti multiplicira okretni moment i okretaje vratila, jer je remenski prijenos i više nego dovoljan da osigura potreban broj okretaja. Prijenosnik u konstrukciji ove drobilice služi da bi osigurao okretanje pogonskih vratila u suprotnome smjeru, potrebnom zbog omogućavanja djelovanja sile isključivo u vertikalnom smjeru. Osim toga, služi i kako bi osigurao dovođenje okretnog momenta na oba vratila koja su zbog konstrukcijskih potreba i montaže prilično udaljena. Da bi se osiguralo okretanje vratila u suprotnom smjeru, potreban je parni broj vratila (zupčanika) u prijenosniku. Budući da s dva zupčanika nije moguće postići potreban razmak vratila (osim ako su oni ekstremno velikog promjera) u konstrukciji prijenosnika nalaze se četiri zupčanika.

Iz konstrukcije je izmjereno da bi razmak dvaju glavnih pogonskih vratila drobilice trebao biti veći od 800 mm kako bi se osiguralo dovoljno prostora za ulazni dio (i za njegovu montažu) koji služi za prihvaćanje kamena. Budući da prijenosnik ima četiri vratila, iz tablice za standardne osne razmake odabrana je (jedina moguća) vrijednost od 280 mm, što daje ukupni razmak pogonskih vratila drobilice od 840 mm. Za manji osni razmak, bilo bi potrebno povećati broj vratila (zupčanika) na šest.



Slika 27. Skica prijenosnika

5.1.3.1. Zupčanici

Svi podaci koji se koriste u ovom dijelu proračuna izvađeni su iz tablica u literaturi [13.].

$$a = a_w = 280 \text{ mm}$$

Prijenosni omjer prijenosnika:

$$u = 1$$

Kut zahvata:

$$\alpha = 20^\circ$$

Budući da su svi zupčanici jednaki što se tiče broja zuba i promjera, napravljeno je nekoliko 3D modela zupčanika promjera 280 mm različitih modula i na temelju procjene odabran je sljedeći modul:

$$m = 5 \text{ mm}$$

iz razloga što ne daje niti prevelik niti premali broj zubi, a osigurava promjer zupčanika od 280 mm, razmak osi vratila također od 280 mm, te prijenosni omjer.

$$z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = 56$$

$$d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = m \cdot z_1 = 5 \cdot 56 = 280 \text{ mm}$$

Faktori pomaka profila:

$$x_1 + x_2 = (z_1 + z_2) \cdot \frac{\text{ev}\alpha_w - \text{ev}\alpha}{2 \cdot \text{tg}\alpha}$$

$$\cos\alpha_w = a \cdot \frac{\cos\alpha}{a_w}$$

Budući da je u ovom slučaju

$$a = a_w,$$

pa je i

$$\alpha_w = \alpha,$$

proizlazi da je:

$$x_1 + x_2 = 0$$

Odnosno:

$$x_1 = 0$$

$$x_2 = 0$$

Prema tome, dimenzije zupčanika su sljedeće:

$$d_1 = m \cdot z_1 = 5 \cdot 56 = 280 \text{ mm}$$

$$d_{a1} = d_1 + 2 \cdot m(1 + x_1) = 280 + 2 \cdot 5(1 + 0) = 290 \text{ mm}$$

$$d_{w1} = d_1 \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = 280 \cdot 1 = 280 \text{ mm}$$

$$d_{f1} = d_1 - 2 \cdot m(1,25 - x_1) = 280 - 2 \cdot 5(1,25 - 0) = 267,5 \text{ mm}$$

$$d_{b1} = d_{w1} \cdot \cos \alpha_w = 280 \cdot \cos 20 = 263,11 \text{ mm}$$

Kao što je već napomenuto, dimenzije ostalih zupčanika su iste.

Kontrola tjemene zračnosti:

Postojeća tjemena zračnost:

$$c = a_w - \frac{d_{a1} + d_{f2}}{2} = 280 - \frac{290 + 267,5}{2} = 1,25 \text{ mm} \geq 0,12 \cdot m = 0,12 \cdot 5 = 0,6 \text{ mm}$$

ZADOVOLJAVA

Ostvarivanje potrebne bočne zračnosti primicanjem alata:

Nazivna mjera preko nekoliko zubi za kontrolu tolerancije:

$$W = m \cdot \cos \alpha \left(\pi \cdot (z_w - 0,5) + z \cdot \operatorname{ev} \alpha + 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha \right) = 5 \cdot \cos 20 \left(\pi \cdot (7 - 0,5) + 56 \cdot \operatorname{ev} 20 + 2 \cdot 0 \cdot \operatorname{tg} 20 \right)$$

$$W = 99,86 \text{ mm}$$

$$z_w = \frac{z}{\pi} \cdot (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{ev} \alpha) - \frac{2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\pi} + 0,5 = \frac{56}{\pi} \cdot (\operatorname{tg} 20 - \operatorname{ev} 20) - \frac{2 \cdot 0 \cdot \operatorname{tg} 20}{\pi} + 0,5 = 6,7 = 7$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{4 \cdot \left(\frac{x}{z}\right) \cdot \left(1 + \frac{x}{z}\right)}{\cos \alpha}} = \sqrt{\operatorname{tg}^2 20 + \frac{4 \cdot \left(\frac{0}{56}\right) \cdot \left(1 + \frac{0}{56}\right)}{\cos 20}} = 0,364$$

Izbor kružne zračnosti:

$$j_{\max} = 245 \text{ } \mu\text{m}$$

$$j_{\min} = 150 \text{ } \mu\text{m}$$

Izbor graničnih odstupanja razmaka osi vratila za kvalitetu obrade zupčanika 7:

$$A_{a,g,d} = \pm 41 \text{ } \mu\text{m}$$

Granična odstupanja debljine zubi:

$$-(A_{W1,d} + A_{W2,d}) = j_{\max} \cdot \cos \alpha - 2 \cdot A_{a,g} \cdot \sin \alpha_w = 245 \cdot \cos 20 - 2 \cdot 41 \cdot \sin 20 = 202 \text{ } \mu\text{m}$$

$$-(A_{W1,g} + A_{W2,g}) = j_{\min} \cdot \cos \alpha - 2 \cdot A_{a,d} \cdot \sin \alpha_w = 150 \cdot \cos 20 - 2 \cdot (-41) \cdot \sin 20 = 169 \text{ } \mu\text{m}$$

Za dobivene podatke odabrano je:

$$A_{W,g} = -76 \text{ } \mu\text{m} \text{ (f)}$$

$$A_{W,d} = -114 \text{ } \mu\text{m} \text{ (e)}$$

Izbor dozvoljenih odstupanja:

$$T_i'' = 97 \mu\text{m}$$

Da bi se izbjeglo zaglavljivanje zuba o zub zupčanika u zahvatu mora biti ispunjen uvjet:

$$j_{\min} > 2 \cdot (T_{i1}'' + T_{i2}'') \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

a ovdje je:

$$T_{i1}'' = T_{i2}'' = T_i''$$

što znači:

$$j_{\min} > 4 \cdot T_i'' \cdot \operatorname{tg} \alpha = 4 \cdot 97 \cdot \operatorname{tg} 20 = 141 \mu\text{m}$$

ZADOVOLJAVA

Za materijal zupčanika odabran je čelik Č 0545.

Kontrola u odnosu na dozvoljeno naprezanje na savijanje u korijenu zuba:

$$\sigma_{F1} = \frac{F_{tw}}{b \cdot m} \cdot Y_{F1} \cdot Y_{\epsilon} \cdot K_{F\alpha1} \leq \sigma_{FP1}$$

$$F_{tw} = \frac{2 \cdot T_{1\max}}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 287235}{280} = 2051,678 \text{ N}$$

$$T_{1\max} = M_{EM} \cdot i_{RP} = 195 \cdot 1,473 = 287,235 \text{ Nm}$$

$$b = \lambda \cdot m = 15 \cdot 5 = 75 \text{ mm}$$

$$\lambda = 15$$

$$Y_{F1} = 2,31$$

$$Y_{\varepsilon} = \frac{1}{1,77} = 0,56$$

$$\varepsilon_{\alpha 1} = \varepsilon_{k1} + \varepsilon_{k2} = 0,887 + 0,887 = 1,77$$

$$\varepsilon_{k1} = \varepsilon'_{k1} \cdot \frac{z_1}{z_{k1}} = 0,887 \cdot \frac{56}{56} = 0,887$$

$$\varepsilon'_{k1} = \frac{z_k \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{z_k + 2}{z_k} \right)^2 - \cos^2 \alpha_{tw}} - \sin \alpha_{tw} \right]}{2 \cdot \pi \cdot \cos \alpha_{tw}}$$

$$\varepsilon'_{k1} = \frac{56 \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{56 + 2}{56} \right)^2 - \cos^2 20} - \sin 20 \right]}{2 \cdot \pi \cdot \cos 20} = 0,887$$

$$z_{k1} = \frac{2 \cdot d_{w1}}{d_{ak1} - d_{w1}} = \frac{2 \cdot 280}{290 - 280} = 56$$

$$q_{L1} = 1$$

$$K_{Fa1} = q_{L1} \cdot \varepsilon_{\alpha 1} = 1 \cdot 1,77 = 1,77$$

$$\sigma_{F1} = \frac{2051,678}{75 \cdot 5} \cdot 2,31 \cdot 0,56 \cdot 1,77 = 12,527 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{FP1} = \frac{\sigma_{Flim}}{S_{F1}} = \frac{190}{2} = 95 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{Flim} = 190 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{F1} = 2$$

$$\sigma_{F1} \leq \sigma_{Flim}$$

ZADOVOLJAVA

Kontrola u odnosu na dozvoljenu čvrstoću boka:

$$\sigma_H = Z_M \cdot Z_H \cdot Z_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{u+1}{u} \cdot \frac{F_{tw}}{b \cdot d_{w1}} \cdot K_{H\alpha}} \leq \sigma_{HP}$$

$$Z_M = 189,5 \sqrt{N/mm^2}$$

$$Z_H = 2,5$$

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{4 - \varepsilon_{\alpha 1}}{3}} = \sqrt{\frac{4 - 1,77}{3}} = 0,86$$

$$K_{H\alpha} = 1,35$$

$$\sigma_H = 189,5 \cdot 2,5 \cdot 0,86 \cdot \sqrt{\frac{1+1}{1} \cdot \frac{2051,678}{75 \cdot 280}} \cdot 1,35 = 209,254 \text{ N/mm}^2$$

$$S_H = \frac{\sigma_{Hlim}}{\sigma_H} = \frac{340}{209,254} = 1,62$$

$$S_{H,potr} = 1,5$$

$$S_H \geq S_{H,potr}$$

ZADOVOLJAVA

5.1.3.2. Vratila prijenosnika

Budući da se vratila mogu okretati u oba smjera, uzet je najnepovoljniji slučaj za svako vratilo posebno. Svi podaci koji se koriste u ovom dijelu proračuna izvađeni su iz tablica u literaturi [13.] i [14.].

S obzirom da su svi zupčanici jednake konstrukcije, na njih djeluju iste radijalne i tangencijalne sile. Na ulazno vratilo djeluje još i dodatna sila koja nastaje od remenskog prijenosa. Prije početka proračuna i određivanja reakcija u osloncima, prvo će biti izračunate te sile. Sile koje se odnose na težinu pojedinih dijelova očitane su iz 3D modela istih u programu Pro/ENGINEER.

Obodna sila na kinematskoj kružnici:

$$F_t = \frac{T_{1\max}}{\frac{d_{w1}}{2}} = \frac{287,235}{\frac{0,280}{2}} = 2051,678 \text{ N}$$

Radijalna sila na kinematskoj kružnici:

$$F_r = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha = 2051,678 \cdot \operatorname{tg} 20 = 746,750 \text{ N}$$

Sila od remenskog prijenosa:

$$F_{RP} = \frac{F_{OR}}{k} = \frac{1499,922}{1} = 1499,922 \text{ N}$$

$$F_{OR} = \frac{T_{1\max}}{\frac{d_{R2}}{2}} = \frac{287,235}{\frac{0,383}{2}} = 1499,922 \text{ N}$$

$$k = \frac{e^{\mu\beta} - 1}{e^{\mu\beta}} = \frac{e^{0,46 \cdot 167,83} - 1}{e^{0,46 \cdot 167,83}} \approx 1$$

$$\mu = 0,22 + 0,012 \cdot v = 0,22 + 0,012 \cdot 20 = 0,46$$

Težina zupčanika:

$$G_z = 137,732 \text{ N}$$

Težina veće remenice:

$$G_{R2} = 397,207 \text{ N}$$

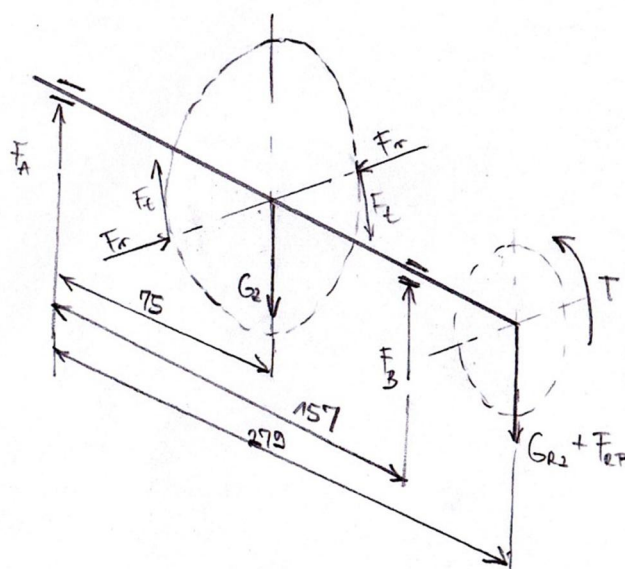
Težina priрубnice za kardansko vratilo:

$$G_p = 32,667 \text{ N}$$

Težina kardanskog vratila:

$$G_k = 329,616 \text{ N}$$

Ulazno vratilo V1:



Slika 28. Skica za proračun sila koje djeluju na ulazno vratilo

Iz skice je vidljivo da se radijalne sile međusobno poništavaju, pa u principu reakcija u horizontalnoj ravnini nema, dok tangencijalne stvaraju moment uvijanja.

Reakcije u osloncima:

$$\sum F_V = 0$$

$$F_A + F_B - G_z - G_{R2} - F_{RP} = 0$$

$$F_A + F_B - 137,732 - 397,207 - 1499,922 = 0$$

$$F_A + F_B = 2034,861 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$-G_z \cdot 0,075 + F_B \cdot 0,157 - (G_{R2} + F_{RP}) \cdot 0,279 = 0$$

$$-137,732 \cdot 0,075 + F_B \cdot 0,157 - (397,207 + 1499,922) \cdot 0,279 = 0$$

$$F_B = 3437,127 \text{ N}$$

$$F_A = -1402,266 \text{ N}$$

Momenti savijanja u pojedinim presjecima:

Presjek 1:

$$M_1 = F_A \cdot 0,025 = 1402,266 \cdot 0,025 = 35,056 \text{ Nm}$$

Presjek 2:

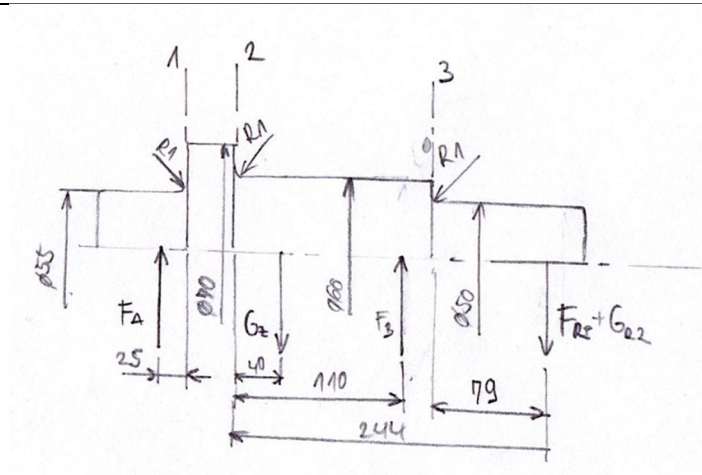
$$M_2 = -G_z \cdot 0,04 + F_B \cdot 0,11 - (F_{RP} + G_{R2}) \cdot 0,244$$

$$M_2 = -137,732 \cdot 0,04 + 3437,127 \cdot 0,11 - (1499,922 + 397,207) \cdot 0,244 = 90,325 \text{ Nm}$$

Presjek 3:

$$M_3 = (F_{RP} + G_{R2}) \cdot 0,079 = (1499,922 + 397,207) \cdot 0,079 = 149,873 \text{ Nm}$$

Za materijal vratila odabran je čelik Č 0461.



Slika 29. Skica za proračun vratila u pojedinim presjecima

Reducirani momenti u pojedinim presjecima:

Faktor čvrstoće:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{fDN}} = \frac{190}{1,73 \cdot 110} = 0,99$$

$$M'_{red1} = \sqrt{M_1^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{35,056^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red1} = 248,748 \text{ Nm}$$

$$M'_{red2} = \sqrt{M_2^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{90,325^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red2} = 262,307 \text{ Nm}$$

$$M'_{red3} = \sqrt{M_3^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{140,873^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red3} = 283,710 \text{ Nm}$$

Promjeri vratila:

$$d_1 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{red1}}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{248748}{40}} = 39,90 \text{ mm}$$

Odabrano $d_1 = 55 \text{ mm}$.

$$d_2 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{\text{red2}}}{\sigma_{\text{fDN,dop}}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{262307}{40}} = 40,62 \text{ mm}$$

Odabrano $d_2 = 60 \text{ mm}$.

$$d_3 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{\text{red3}}}{\sigma_{\text{fDN,dop}}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{283710}{40}} = 41,69 \text{ mm}$$

Odabrano $d_3 = 50 \text{ mm}$.

Ovi promjeri su odabrani iz konstrukcijskih razloga, zbog omogućavanja oslonaca s jedne strane za zupčanike i ležajeve, zbog stupnjevanja vratila potrebnih definiranih od proizvođača ležajeva, te zbog stupnjevanja vratila radi omogućavanja lakše montaže i manje potrebnih površina za dodatnu obradu. Vratilo je na nekim promjerima između dodatno stupnjevano s obzirom na sliku koja prikazuje skicu za proračun koncentracije naprezanja. Ovo se odnosi i na sva ostala vratila u prijenosniku.

Kontrolni proračun vratila V1 u pojedinim presjecima s obzirom na koncentraciju naprezanja:

Presjek 1:

$$S_1 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red1}}}$$

$$\sigma_{\text{red1}} = \frac{M_{\text{red1}}}{W_1} = \frac{M_{\text{red1}}}{0,1 \cdot d_1^3}$$

$$b_1 = 0,81$$

$$b_2 = 0,92$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red1}} = \sqrt{(M'_{\text{red1}} \cdot \beta_{\text{kf}})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{\text{kt}})^2}$$

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 (\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,3(2,1 - 1) = 1,33$$

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 (\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 0,55(1,65 - 1) = 1,36$$

$$c_1 = 0,3$$

$$\beta_{kf2} = 2,1$$

$$c_2 = 0,55$$

$$\beta_{kt1,4} = 1,65$$

$$M_{red1} = \sqrt{(248,748 \cdot 1,33)^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235 \cdot 1,36)^2} = 470,769 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{red1} = \frac{470769}{0,1 \cdot 55^3} = 28,296 \text{ N/mm}^2$$

$$S_1 = \frac{0,81 \cdot 0,92 \cdot 190}{2 \cdot 28,296} = 2,5$$

$$S_{potr} = 1,4$$

$$S_1 > S_{potr}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 2:

$$S_2 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{red2}}$$

$$\sigma_{red2} = \frac{M_{red2}}{W_2} = \frac{M_{red2}}{0,1 \cdot d_2^3}$$

$$b_1 = 0,80$$

$$b_2 = 0,90$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{red2} = \sqrt{(M'_{red2} \cdot \beta_{kf})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{kt})^2}$$

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 (\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,34(2,1 - 1) = 1,37$$

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 (\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 0,65(1,65 - 1) = 1,42$$

$$c_1 = 0,34$$

$$\beta_{kf2} = 2,1$$

$$c_2 = 0,65$$

$$\beta_{kt1,4} = 1,65$$

$$M_{red2} = \sqrt{(262,307 \cdot 1,37)^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235 \cdot 1,42)^2} = 501,425 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{red2} = \frac{501426}{0,1 \cdot 60^3} = 23,214 \text{ N/mm}^2$$

$$S_2 = \frac{0,80 \cdot 0,90 \cdot 190}{2 \cdot 23,214} = 2,94$$

$$S_{potr} = 1,4$$

$$S_2 > S_{potr}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 3:

$$S_3 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{red3}}$$

$$\sigma_{red3} = \frac{M_{red3}}{W_3} = \frac{M_{red3}}{0,1 \cdot d_3^3}$$

$$b_1 = 0,82$$

$$b_2 = 0,91$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{red3} = \sqrt{(M'_{red3} \cdot \beta_{kf})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{kt})^2}$$

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 (\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,45(2,5 - 1) = 1,68$$

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 (\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 0,8(1,75 - 1) = 1,6$$

$$c_1 = 0,45$$

$$\beta_{kf2} = 2,5$$

$$c_2 = 0,8$$

$$\beta_{kt1,4} = 1,75$$

$$M_{red3} = \sqrt{(283,710 \cdot 1,68)^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235 \cdot 1,6)^2} = 618,412 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{red3} = \frac{618412}{0,1 \cdot 50^3} = 49,473 \text{ N/mm}^2$$

$$S_3 = \frac{0,82 \cdot 0,91 \cdot 190}{2 \cdot 49,473} = 1,43$$

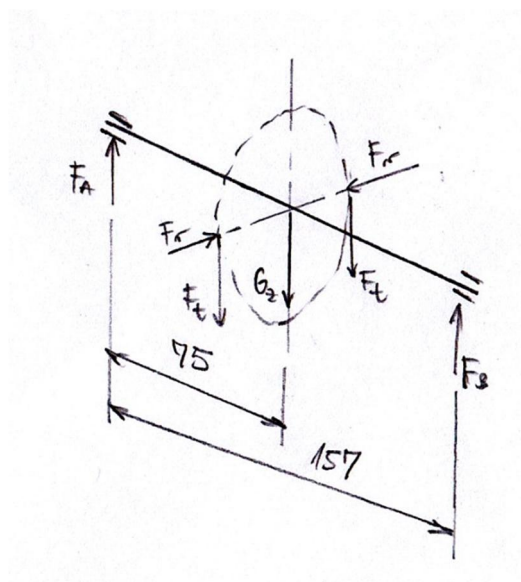
$$S_{potr} = 1,4$$

$$S_3 > S_{potr}$$

ZADOVOLJAVA

Srednje vratilo V2:

Ovdje se strogo gledano u principu ne radi o vratilu već o osovinu, budući da ovaj dio nije opterećen na uvijanje.



Slika 30. Skica za proračun sila koje djeluju osovinu

Iz skice je vidljivo da se radijalne sile međusobno poništavaju, pa u principu reakcija u horizontalnoj ravnini nema.

Reakcije u osloncima:

$$\sum F_v = 0$$

$$F_A + F_B - G_z - 2 \cdot F_t = 0$$

$$F_A + F_B - 137,732 - 2 \cdot 2051,678 = 0$$

$$F_A + F_B = 4241,088 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$-G_z \cdot 0,075 - 2 \cdot F_t \cdot 0,075 + F_B \cdot 0,157 = 0$$

$$-137,732 \cdot 0,075 - 2 \cdot 2051,678 \cdot 0,075 + F_B \cdot 0,157 = 0$$

$$F_B = 2025,997 \text{ N}$$

$$F_A = 2215,091 \text{ N}$$

Momenti savijanja u pojedinim presjecima:

Presjek 1:

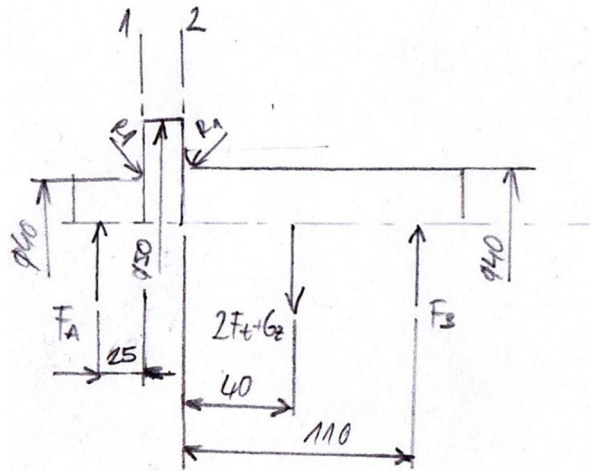
$$M_1 = F_A \cdot 0,025 = 2215,091 \cdot 0,025 = 55,377 \text{ Nm}$$

Presjek 2:

$$M_2 = -G_z \cdot 0,04 - 2 \cdot F_t \cdot 0,04 + F_B \cdot 0,11$$

$$M_2 = -137,732 \cdot 0,04 - 2 \cdot 2051,678 \cdot 0,04 + 2025,997 \cdot 0,11 = 53,216 \text{ Nm}$$

Za materijal osovine odabran je čelik Č 0461.



Slika 31. Skica za proračun osovine u pojedinim presjecima

Faktor čvrstoće:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{fDN}} = \frac{190}{1,73 \cdot 110} = 0,99$$

Promjeri vratila:

$$d_1 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_1}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{55377}{40}} = 24,18 \text{ mm}$$

Odabrano $d_1 = 40 \text{ mm}$.

$$d_2 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_2}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{53216}{40}} = 23,87 \text{ mm}$$

Odabrano $d_2 = 40 \text{ mm}$.

Kontrolni proračun osovine V2 u pojedinim presjecima s obzirom na koncentraciju naprezanja:

Presjek 1:

$$S_1 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{red1}}$$

$$\sigma_{\text{red1}} = \frac{M_{\text{red1}}}{W_1} = \frac{M_{\text{red1}}}{0,1 \cdot d_1^3}$$

$$b_1 = 0,85$$

$$b_2 = 0,92$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red1}} = M_1 \cdot \beta_{\text{kf}}$$

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) = 1 + 0,6(2,05 - 1) = 1,63$$

$$c_1 = 0,6$$

$$\beta_{\text{kf2}} = 2,05$$

$$M_{\text{red1}} = 55,377 \cdot 1,63 = 90,264 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red1}} = \frac{90264}{0,1 \cdot 40^3} = 14,104 \text{ N/mm}^2$$

$$S_1 = \frac{0,85 \cdot 0,92 \cdot 190}{2 \cdot 14,104} = 5,267$$

$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_1 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 2:

$$S_2 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red2}}}$$

$$\sigma_{\text{red2}} = \frac{M_{\text{red2}}}{W_2} = \frac{M_{\text{red2}}}{0,1 \cdot d_2^3}$$

$$b_1 = 0,85$$

$$b_2 = 0,90$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red2}} = M_2 \cdot \beta_{\text{kf}}$$

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) = 1 + 0,6(2,05 - 1) = 1,63$$

$$c_1 = 0,6$$

$$\beta_{\text{kf2}} = 2,05$$

$$M_{\text{red2}} = 53,216 \cdot 1,63 = 86,742 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red2}} = \frac{86742}{0,1 \cdot 40^3} = 13,553 \text{ N/mm}^2$$

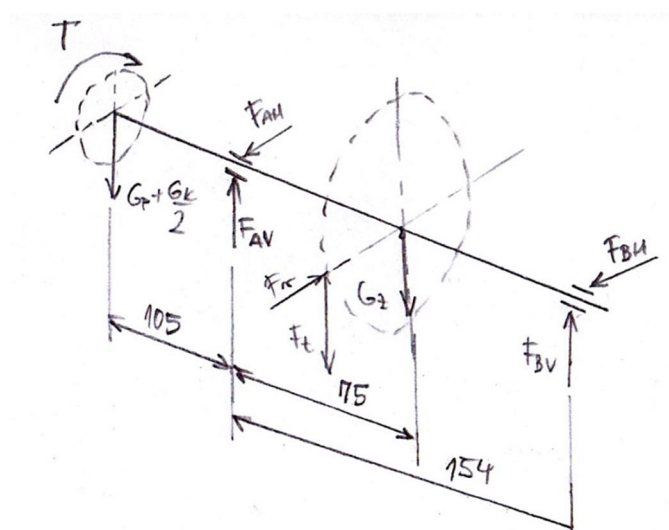
$$S_2 = \frac{0,85 \cdot 0,90 \cdot 190}{2 \cdot 13,553} = 5,36$$

$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_2 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

Izlazno vratilo V3:



Slika 32. Skica za proračun sila koje djeluju na izlazno vratilo

Reakcije u osloncima:

Horizontalna ravnina:

$$\sum F_H = 0$$

$$F_{AH} + F_{BH} - F_r = 0$$

$$F_{AH} + F_{BH} - 746,750 = 0$$

$$F_{AH} + F_{BH} = 746,750 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$F_r \cdot 0,075 - F_{BH} \cdot 0,154 = 0$$

$$746,750 \cdot 0,075 - F_{BH} \cdot 0,154 = 0$$

$$F_{BH} = 363,677 \text{ N}$$

$$F_{AH} = 383,073 \text{ N}$$

Vertikalna ravnina:

$$\sum F_V = 0$$

$$F_{AV} + F_{BV} - G_z - F_t - G_p - \frac{G_k}{2} = 0$$

$$F_{AV} + F_{BV} - 137,732 - 2051,678 - 32,667 - 164,808 = 0$$

$$F_{AV} + F_{BV} = 2386,885 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$\left(G_p + \frac{G_k}{2} \right) \cdot 0,105 - (F_t + G_z) \cdot 0,075 + F_{BV} \cdot 0,154 = 0$$

$$(32,667 + 164,808) \cdot 0,105 - (2051,678 + 137,732) \cdot 0,075 + F_{BV} \cdot 0,154 = 0$$

$$F_{BV} = -931,629 \text{ N}$$

$$F_{AV} = 3318,514 \text{ N}$$

Ukupna reakcija u osloncima A i B:

$$F_A = \sqrt{F_{AH}^2 + F_{AV}^2} = \sqrt{383,073^2 + 3318,514^2} = 3340,551 \text{ N}$$

$$F_B = \sqrt{F_{BH}^2 + F_{BV}^2} = \sqrt{363,677^2 + 931,629^2} = 1000,097 \text{ N}$$

Momenti savijanja u pojedinim presjecima:

Presjek 1:

$$M_1 = \left(G_p + \frac{G_k}{2} \right) \cdot 0,1 = (32,667 + 164,808) \cdot 0,1 = 19,747 \text{ Nm}$$

Presjek 2:

$$M_2 = \left(G_p + \frac{G_k}{2} \right) \cdot 0,13 - F_A \cdot 0,025$$

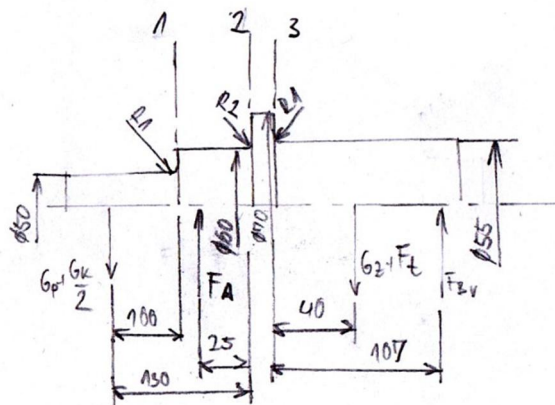
$$M_2 = (32,667 + 164,808) \cdot 0,13 - 3340,551 \cdot 0,025 = 57,842 \text{ Nm}$$

Presjek 3:

$$M_3 = G_z \cdot 0,04 + F_B \cdot 0,107$$

$$M_3 = 137,732 \cdot 0,04 + 1000,097 \cdot 0,107 = 112,520 \text{ Nm}$$

Za materijal vratila odabran je čelik Č 0461.



Slika 33. Skica za proračun vratila u pojedinim presjecima

Reducirani momenti u pojedinim presjecima:

Faktor čvrstoće:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{fDN}} = \frac{190}{1,73 \cdot 110} = 0,99$$

$$M'_{red1} = \sqrt{M_1^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{19,747^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red1} = 247,056 \text{ Nm}$$

$$M'_{red2} = \sqrt{M_2^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{57,842^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red2} = 252,967 \text{ Nm}$$

$$M'_{red3} = \sqrt{M_3^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{112,520^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red3} = 270,753 \text{ Nm}$$

Promjeri vratila:

$$d_1 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{red1}}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{247056}{40}} = 39,81 \text{ mm}$$

Odabrano $d_1 = 50 \text{ mm}$.

$$d_2 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{\text{red2}}}{\sigma_{\text{fDN,dop}}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{252967}{40}} = 40,13 \text{ mm}$$

Odabrano $d_2 = 60 \text{ mm}$.

$$d_3 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{\text{red3}}}{\sigma_{\text{fDN,dop}}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{270753}{40}} = 41,05 \text{ mm}$$

Odabrano $d_3 = 55 \text{ mm}$.

Kontrolni proračun vratila V3 u pojedinim presjecima s obzirom na koncentraciju naprežanja:

Presjek 1:

$$S_1 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red1}}}$$

$$\sigma_{\text{red1}} = \frac{M_{\text{red1}}}{W_1} = \frac{M_{\text{red1}}}{0,1 \cdot d_1^3}$$

$$b_1 = 0,81$$

$$b_2 = 0,92$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red1}} = \sqrt{\left(M'_{\text{red1}} \cdot \beta_{\text{kf}}\right)^2 + 0,75 \cdot \left(\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{\text{kt}}\right)^2}$$

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) = 1 + 0,45(2,05 - 1) = 1,47$$

$$\beta_{\text{kt}} = 1 + c_2 (\beta_{\text{kt1,4}} - 1) = 1 + 0,8(1,6 - 1) = 1,48$$

$$c_1 = 0,45$$

$$\beta_{\text{kf2}} = 2,05$$

$$c_2 = 0,8$$

$$\beta_{\text{kt1,4}} = 1,6$$

$$M_{red1} = \sqrt{(247,056 \cdot 1,47)^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235 \cdot 1,48)^2} = 514,523 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{red1} = \frac{514523}{0,1 \cdot 50^3} = 41,162 \text{ N/mm}^2$$

$$S_1 = \frac{0,81 \cdot 0,92 \cdot 190}{2 \cdot 41,162} = 1,72$$

$$S_{potr} = 1,4$$

$$S_1 > S_{potr}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 2:

$$S_2 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{red2}}$$

$$\sigma_{red2} = \frac{M_{red2}}{W_2} = \frac{M_{red2}}{0,1 \cdot d_2^3}$$

$$b_1 = 0,80$$

$$b_2 = 0,90$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{red2} = \sqrt{(M'_{red2} \cdot \beta_{kf})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{kt})^2}$$

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 (\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,34(2,1 - 1) = 1,37$$

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 (\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 0,65(1,65 - 1) = 1,42$$

$$c_1 = 0,34$$

$$\beta_{kf2} = 2,1$$

$$c_2 = 0,65$$

$$\beta_{kt1,4} = 1,65$$

$$M_{red2} = \sqrt{(252,967 \cdot 1,37)^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235 \cdot 1,42)^2} = 492,336 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red2}} = \frac{492336}{0,1 \cdot 60^3} = 22,793 \text{ N/mm}^2$$

$$S_2 = \frac{0,80 \cdot 0,90 \cdot 190}{2 \cdot 22,793} = 3,00$$

$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_2 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 3:

$$S_3 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red2}}}$$

$$\sigma_{\text{red3}} = \frac{M_{\text{red3}}}{W_3} = \frac{M_{\text{red3}}}{0,1 \cdot d_3^3}$$

$$b_1 = 0,81$$

$$b_2 = 0,90$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red3}} = \sqrt{(M'_{\text{red3}} \cdot \beta_{\text{kf}})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{\text{kt}})^2}$$

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) = 1 + 0,25(2,2 - 1) = 1,3$$

$$\beta_{\text{kt}} = 1 + c_2 (\beta_{\text{kt1,4}} - 1) = 1 + 0,55(1,8 - 1) = 1,44$$

$$c_1 = 0,25$$

$$\beta_{\text{kf2}} = 2,2$$

$$c_2 = 0,55$$

$$\beta_{\text{kt1,4}} = 1,8$$

$$M_{\text{red3}} = \sqrt{(270,753 \cdot 1,3)^2 + 0,75 \cdot (0,99 \cdot 287,235 \cdot 1,44)^2} = 499,646 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red3}} = \frac{499646}{0,1 \cdot 55^3} = 30,031 \text{ N/mm}^2$$

$$S_3 = \frac{0,81 \cdot 0,90 \cdot 190}{2 \cdot 30,031} = 2,31$$

$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_3 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

5.1.3.3. Ležajevi za vratila prijenosnika

Ležajevi FAG-a se proračunavaju prema formuli:

$$C_1 = \frac{f_t \cdot f_L}{f_n} \cdot P$$

P označava iznos radijalne sile u ležaju.

Budući da su faktori tvrdoće, pogonskih uvjeta i okretanja za sve ležajeve isti, prvo će oni biti izračunati:

Faktor tvrdoće:

$$f_t = 1$$

(za temperaturu manju od 120 °C).

Faktor pogonskih uvjeta:

$$f_L = \sqrt[3]{\frac{L_h}{500}} = \sqrt[3]{\frac{20000}{500}} = 3,420$$

$$L_h = 20000$$

Faktor okretanja:

$$f_n = \sqrt[3]{\frac{33,33}{n}} = \sqrt[3]{\frac{33,33}{1000}} = 0,322$$

Vratilo V1:

Ležaj u osloncu A:

$$C_1 = \frac{1 \cdot 3,240}{0,322} \cdot 1402,266 = 14109,757 \text{ N}$$

Odabran je kuglični ležaj 16011 sa $C = 20600 \text{ N}$

$$C_1 < C$$

ZADOVOLJAVA

Ležaj u osloncu B:

$$C_1 = \frac{1 \cdot 3,240}{0,322} \cdot 3437,127 = 34584,756 \text{ N}$$

Odabran je kuglični ležaj 6212 sa $C = 56000 \text{ N}$

$$C_1 < C$$

ZADOVOLJAVA

Osovina V2:

Ležaj u osloncu A:

$$C_1 = \frac{1 \cdot 3,240}{0,322} \cdot 2025,997 = 20385,808 \text{ N}$$

Odabran je kuglični ležaj 62108 sa $C = 31000 \text{ N}$

$$C_1 < C$$

ZADOVOLJAVA

Ležaj u osloncu B:

$$C_1 = \frac{1 \cdot 3,240}{0,322} \cdot 2215,091 = 22288,493 \text{ N}$$

Odabran je kuglični ležaj 62108 sa $C = 31000 \text{ N}$

$$C_1 < C$$

ZADOVOLJAVA

Vratilo V3:

Ležaj u osloncu A:

$$C_1 = \frac{1 \cdot 3,240}{0,322} \cdot 3340,551 = 33612,997 \text{ N}$$

Odabran je kuglični ležaj 6212 sa $C = 56000 \text{ N}$

$$C_1 < C$$

ZADOVOLJAVA

Ležaj u osloncu B:

$$C_1 = \frac{1 \cdot 3,240}{0,322} \cdot 1000,097 = 10063,088 \text{ N}$$

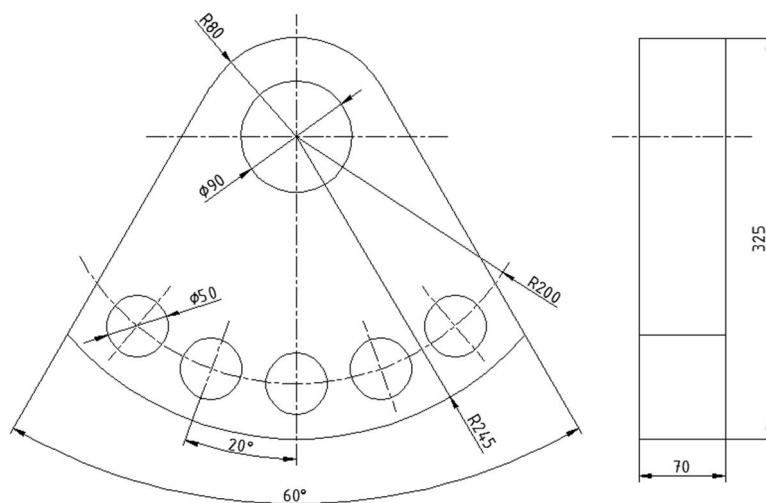
Odabran je kuglični ležaj 16011 sa $C = 20600 \text{ N}$

$$C_1 < C$$

ZADOVOLJAVA

5.1.4. Utezi

Na temelju prijedloga i konzultacija s mentorom donešena je odluka da će konačne dimenzije i oblik utega biti sljedeći:



Slika 34. Utteg za grubo balansiranje

U provrte na utegu stavljaju se mali cilindrični utezi za fino balansiranje promjera 50 i dužine 70 mm. S obzirom na raspored masa za fino balansiranje, iznos ukupne centrifugalne sile za određeni slučaj dan je u sljedećoj tablici:

Raspored utega za fino balansiranje	Ukupna masa jednog utega [kg]	Polumjer težišta [mm]	Ukupna centrifugalna sila [kN]
XXXXX	33,213	101	146,544
OOOOO	38,608	112	188,900
XXOXX	34,292	104	155,800
XOOOX	36,450	109	173,568
XOXOX	35,371	107	165,340
OXOXO	36,450	107	170,380
OXXXO	35,371	104	160,704
OOXOO	37,529	109	178,704

Tablica 2. Centrifugalne sile

Oznaka „X“ označuje prazno mjesto bez utega za fino balansiranje, dok oznaka „O“ označuje da je uteg za fino balansiranje umetnut na označeno mjesto. Ukupna masa jednog utega jednaka je zbroju mase utega za grubo balansiranje i masa malih utega za fino balansiranje, ako su isti umetnuti.

Mase i polumjeri težišta su očitani iz modela napravljenog u programu Pro/ENGINEER.

Centrifugalna sila jednog utega računata je po formuli:

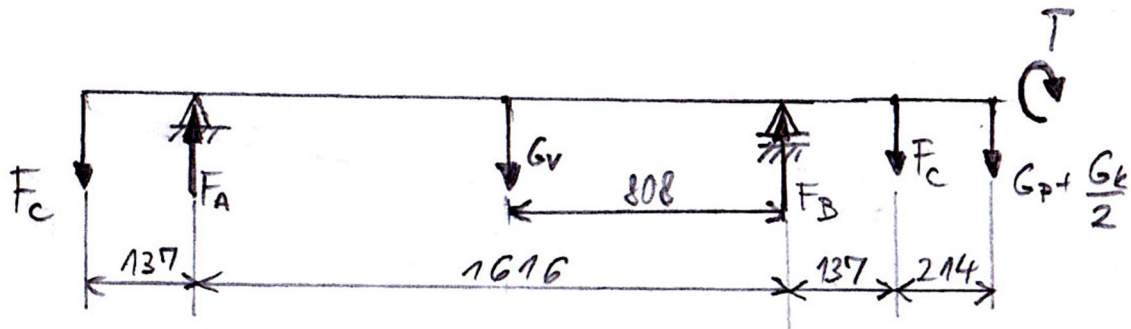
$$F_c = m \cdot r_T \cdot \omega^2 \text{ [kN]}$$

Pa tada ukupna centrifugalna sila iznosi:

$$F_{c,uk} = 4 \cdot F_c \text{ [kN]}$$

5.1.5. Pogonska vratila

Svi podaci koji se koriste u ovom dijelu proračuna izvađeni su iz tablica u literaturi [13.] i [14.].



Slika 35. Skica za proračun sila koje djeluju na pogonsko vratilo

Reakcije u osloncima:

$$\sum F_v = 0$$

$$-2F_c + F_A + F_B - G_v - G_{pr} - \frac{G_k}{2} = 0$$

$$-2 \cdot 47225 + F_A + F_B - 1619,239 - 48,834 - 164,808 = 0$$

$$F_A + F_B = 96282,881 \text{ N}$$

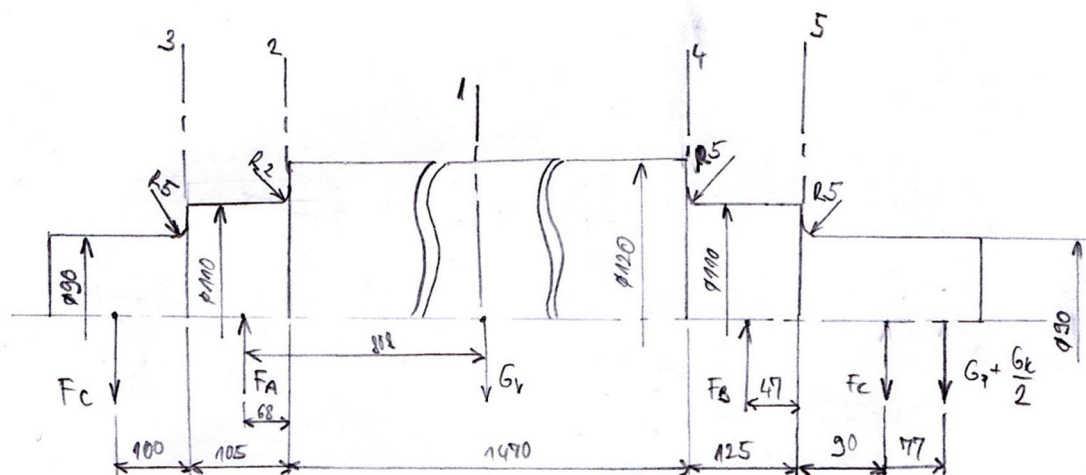
$$\sum M_A = 0$$

$$F_c \cdot 0,137 - G_v \cdot 0,808 + F_B \cdot 1,616 - F_c \cdot 1,753 - \left(G_p + \frac{G_k}{2} \right) \cdot 1,830 = 0$$

$$47225 \cdot 0,137 - 1619,239 \cdot 0,808 + F_B \cdot 1,616 - 47225 \cdot 1,753 - 213,642 \cdot 1,830 = 0$$

$$F_B = 48276,553 \text{ N}$$

$$F_A = 48006,328 \text{ N}$$



Slika 36. Skica za proračun vratila u pojedinim presjecima

Momenti savijanja u pojedinim presjecima:

Presjek 1:

$$M_1 = F_c \cdot (0,137 + 0,808) - F_A \cdot 0,808 = 47225 \cdot (0,137 + 0,808) - 48006,328 \cdot 0,808$$

$$M_1 = 5838,512 \text{ Nm}$$

Presjek 2:

$$M_2 = F_c \cdot 0,205 - F_A \cdot 0,068 = 47225 \cdot 0,205 - 48006,328 \cdot 0,068 = 6416,695 \text{ Nm}$$

Presjek 3:

$$M_3 = F_c \cdot 0,1 = 47225 \cdot 0,1 = 4722,500 \text{ Nm}$$

Presjek 4:

$$M_4 = -F_B \cdot 0,078 + F_c \cdot 0,215 + \left(G_p + \frac{G_k}{2} \right) \cdot 0,292$$

$$M_4 = -48276,553 \cdot 0,078 + 47225 \cdot 0,215 + 213,642 \cdot 0,292 = 6450,187 \text{ Nm}$$

Presjek 5:

$$M_5 = F_c \cdot 0,09 + \left(G_p + \frac{G_k}{2} \right) \cdot 0,167 = 47225 \cdot 0,09 + 213,642 \cdot 0,167$$

$$M_5 = 4285,928 \text{ Nm}$$

Za materijal vratila odabran je čelik Č 0745.

Reducirani momenti u pojedinim presjecima:

Faktor čvrstoće:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{fDN}} = \frac{320}{1,73 \cdot 190} = 0,97$$

$$M'_{red1} = \sqrt{M_1^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{5838,512^2 + 0,75 \cdot (0,97 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red1} = 5843,496 \text{ Nm}$$

$$M'_{red2} = \sqrt{M_2^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{6416,695^2 + 0,75 \cdot (0,97 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red2} = 6421,230 \text{ Nm}$$

$$M'_{red3} = \sqrt{M_3^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{4722,5^2 + 0,75 \cdot (0,97 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red3} = 4728,660 \text{ Nm}$$

$$M'_{red4} = \sqrt{M_4^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{6450,187^2 + 0,75 \cdot (0,97 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red4} = 6454,698 \text{ Nm}$$

$$M'_{red5} = \sqrt{M_5^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v)^2} = \sqrt{4285,928^2 + 0,75 \cdot (0,97 \cdot 287,235)^2}$$

$$M'_{red5} = 4292,715 \text{ Nm}$$

Promjeri vratila:

$$d_1 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{red1}}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{5843496}{80}} = 90,71 \text{ mm}$$

Odabrano $d_1 = 120 \text{ mm}$.

$$d_2 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{red2}}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{6421230}{80}} = 93,61 \text{ mm}$$

Odabrano $d_2 = 110 \text{ mm}$.

$$d_3 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{red3}}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{4728660}{80}} = 84,53 \text{ mm}$$

Odabrano $d_3 = 90 \text{ mm}$.

$$d_4 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{red4}}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{6454698}{80}} = 93,77 \text{ mm}$$

Odabrano $d_4 = 110 \text{ mm}$.

$$d_5 = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{M'_{red5}}{\sigma_{fDN,dop}}} = 2,17 \cdot \sqrt[3]{\frac{4292715}{80}} = 81,85 \text{ mm}$$

Odabrano $d_5 = 90 \text{ mm}$.

Kontrolni proračun vratila u pojedinim presjecima s obzirom na koncentraciju naprezanja:

Presjek 1:

$$S_1 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{red1}}$$

$$\sigma_{red1} = \frac{M_{red1}}{W_1} = \frac{M_{red1}}{0,1 \cdot d_1^3}$$

$$b_1 = 0,75$$

$$b_2 = 0,93$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{red1} = M'_{red1} = 5843,496 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red1}} = \frac{5843496}{0,1 \cdot 120^3} = 33,816 \text{ N/mm}^2$$

$$S_1 = \frac{0,75 \cdot 0,93 \cdot 320}{2 \cdot 33,816} = 3,3$$

$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_1 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 2:

$$S_2 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red2}}}$$

$$\sigma_{\text{red2}} = \frac{M_{\text{red2}}}{W_2} = \frac{M_{\text{red2}}}{0,1 \cdot d_2^3}$$

$$b_1 = 0,78$$

$$b_2 = 0,95$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red2}} = \sqrt{(M'_{\text{red2}} \cdot \beta_{\text{kf}})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{\text{kt}})^2}$$

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) = 1 + 0,25(2,1 - 1) = 1,27$$

$$\beta_{\text{kt}} = 1 + c_2 (\beta_{\text{kt1,4}} - 1) = 1 + 0,45(1,6 - 1) = 1,27$$

$$c_1 = 0,25$$

$$\beta_{\text{kf2}} = 2,1$$

$$c_2 = 0,45$$

$$\beta_{\text{kt1,4}} = 1,6$$

$$M_{\text{red2}} = \sqrt{(6421,230 \cdot 1,27)^2 + 0,75 \cdot (0,97 \cdot 287,235 \cdot 1,27)^2} = 8160,717 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red2}} = \frac{8160717}{0,1 \cdot 110^3} = 61,312 \text{ N/mm}^2$$

$$S_2 = \frac{0,78 \cdot 0,95 \cdot 320}{2 \cdot 61,312} = 1,93$$

$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_2 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 3:

$$S_3 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red3}}}$$

$$\sigma_{\text{red3}} = \frac{M_{\text{red3}}}{W_3} = \frac{M_{\text{red3}}}{0,1 \cdot d_3^3}$$

$$b_1 = 0,79$$

$$b_2 = 0,95$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red3}} = \sqrt{(M'_{\text{red3}} \cdot \beta_{\text{kf}})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{\text{kt}})^2}$$

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) = 1 + 0,4(1,75 - 1) = 1,3$$

$$\beta_{\text{kt}} = 1 + c_2 (\beta_{\text{kt1,4}} - 1) = 1 + 0,8(1,2 - 1) = 1,16$$

$$c_1 = 0,4$$

$$\beta_{\text{kf2}} = 1,75$$

$$c_2 = 0,8$$

$$\beta_{\text{kt1,4}} = 1,2$$

$$M_{\text{red3}} = \sqrt{(4728,660 \cdot 1,3)^2 + 0,75 \cdot (0,97 \cdot 287,235 \cdot 1,16)^2} = 6153,626 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red3}} = \frac{6153626}{0,1 \cdot 90^3} = 84,412 \text{ N/mm}^2$$

$$S_3 = \frac{0,78 \cdot 0,95 \cdot 320}{2 \cdot 84,412} = 1,41$$

$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_3 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 4:

$$S_4 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red4}}}$$

$$\sigma_{\text{red4}} = \frac{M_{\text{red4}}}{W_4} = \frac{M_{\text{red4}}}{0,1 \cdot d_4^3}$$

$$b_1 = 0,78$$

$$b_2 = 0,95$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red4}} = \sqrt{\left(M'_{\text{red4}} \cdot \beta_{\text{kf}}\right)^2 + 0,75 \cdot \left(\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{\text{kt}}\right)^2}$$

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) = 1 + 0,25(1,77 - 1) = 1,19$$

$$\beta_{\text{kt}} = 1 + c_2 (\beta_{\text{kt1,4}} - 1) = 1 + 0,45(1,25 - 1) = 1,11$$

$$c_1 = 0,25$$

$$\beta_{\text{kf2}} = 1,77$$

$$c_2 = 0,45$$

$$\beta_{\text{kt1,4}} = 1,25$$

$$M_{\text{red4}} = \sqrt{(6454,698 \cdot 1,19)^2 + 0,75 \cdot (0,97 \cdot 287,235 \cdot 1,11)^2} = 7685,758 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red4}} = \frac{7685758}{0,1 \cdot 110^3} = 57,744 \text{ N/mm}^2$$

$$S_4 = \frac{0,78 \cdot 0,95 \cdot 320}{2 \cdot 57,744} = 2,05$$

$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_4 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

Presjek 5:

$$S_5 = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{\text{fDN}}}{\varphi \cdot \sigma_{\text{red5}}}$$

$$\sigma_{\text{red5}} = \frac{M_{\text{red5}}}{W_5} = \frac{M_{\text{red5}}}{0,1 \cdot d_5^3}$$

$$b_1 = 0,79$$

$$b_2 = 0,95$$

$$\varphi = 2$$

$$M_{\text{red5}} = \sqrt{\left(M'_{\text{red5}} \cdot \beta_{\text{kf}}\right)^2 + 0,75 \cdot \left(\alpha_0 \cdot T_v \cdot \beta_{\text{kt}}\right)^2}$$

$$\beta_{\text{kf}} = 1 + c_1 (\beta_{\text{kf2}} - 1) = 1 + 0,4(1,75 - 1) = 1,3$$

$$\beta_{\text{kt}} = 1 + c_2 (\beta_{\text{kt1,4}} - 1) = 1 + 0,8(1,2 - 1) = 1,16$$

$$c_1 = 0,4$$

$$\beta_{\text{kf2}} = 1,75$$

$$c_2 = 0,8$$

$$\beta_{\text{kt1,4}} = 1,2$$

$$M_{\text{red5}} = \sqrt{\left(4292,715 \cdot 1,3\right)^2 + 0,75 \cdot \left(0,97 \cdot 287,235 \cdot 1,16\right)^2} = 5587,544 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{\text{red5}} = \frac{5587544}{0,1 \cdot 90^3} = 76,647 \text{ N/mm}^2$$

$$S_5 = \frac{0,78 \cdot 0,95 \cdot 320}{2 \cdot 76,647} = 1,54$$

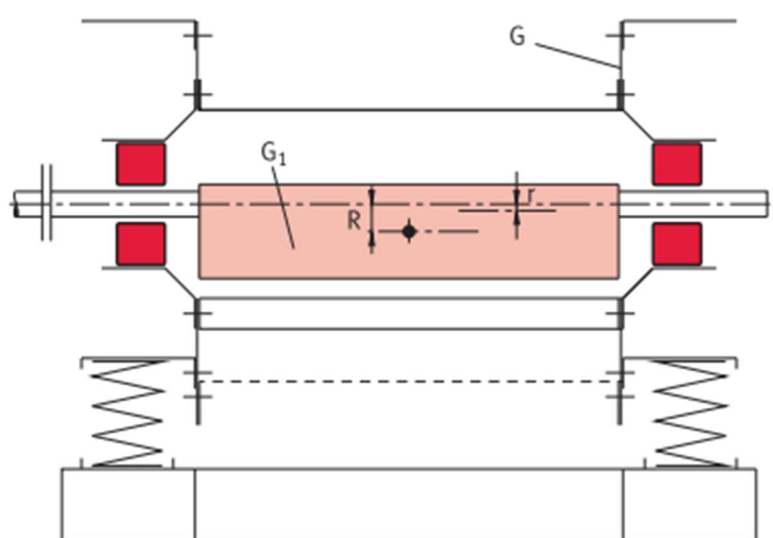
$$S_{\text{potr}} = 1,4$$

$$S_5 > S_{\text{potr}}$$

ZADOVOLJAVA

5.1.6. Ležajevi pogonskih vratila

Ležajevi su proračunati prema uputama i formulama iz FAG-ovog kataloga ležajeva za vibracijske strojeve [24.]. Na isti način su konstrukcijski oblikovana ležajna mjesta.



Slika 37. Skica za proračun iz FAG-ovog kataloga

$$m_{1u} = 38,608 \text{ kg}$$

$$R = 0,111 \text{ m}$$

$$G = 4000 \cdot 9,81 = 39240 \text{ N}$$

$$n = 1000 \text{ min}^{-1}$$

$$z = 4$$

$$G_1 = 4 \cdot m_{1u} \cdot g = 4 \cdot 38,608 \cdot 9,81 = 1514,978 \text{ N}$$

$$G \cdot r = G_1(R - r)$$

$$r = \frac{G_1 \cdot R}{G + G_1} = \frac{1,515 \cdot 0,111}{39,240 + 1,515} = 0,0014 \text{ m}$$

$$F_{r,\min} = \frac{1}{z} \cdot \frac{G_1}{g} \cdot (R - r) \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2$$

$$F_{r,\min} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1,514}{9,81} \cdot (0,111 - 0,0014) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1000}{30} \right)^2 = 46,373 \text{ kN}$$

$$F_{r,\max} = \frac{1}{z} \cdot \frac{G_1}{g} \cdot R \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2$$

$$F_{r,\max} = \frac{1}{4} \cdot \frac{1,514}{9,81} \cdot R \cdot \left(\frac{\pi \cdot 1000}{30} \right)^2 = 46,965 \text{ kN}$$

$$F_r = 0,68 \cdot F_{r,\max} + 0,32 \cdot F_{r,\min}$$

$$F_r = 0,68 \cdot 46,965 + 0,32 \cdot 46,373 = 46,775 \text{ kN}$$

$$P = 1,2 \cdot F_r = 1,2 \cdot 46,775 = 56,130 \text{ kN}$$

Sljedeći podaci su očitani iz tablice [24.], str. 12:

$$L_h = 50000 \text{ h}$$

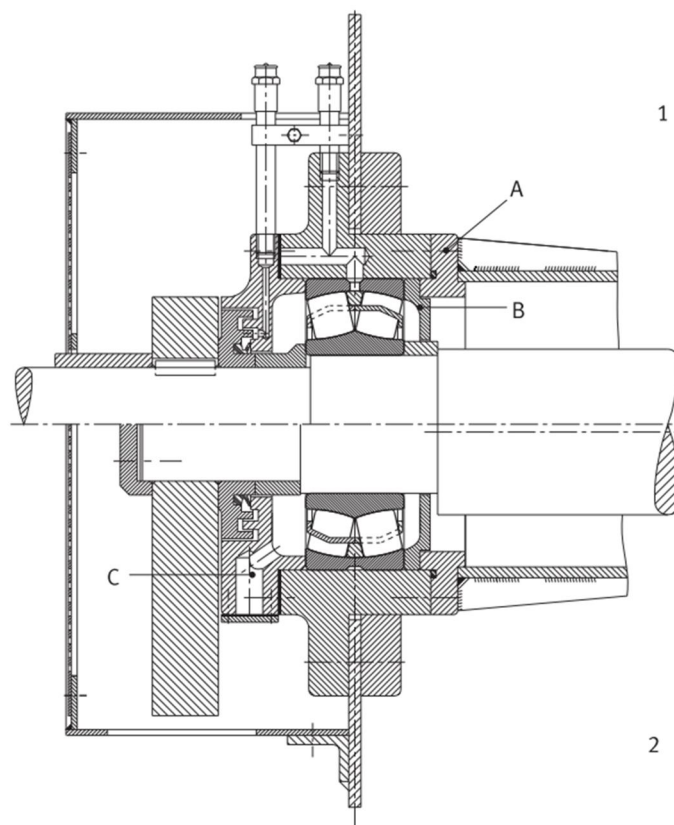
$$\frac{C}{P} = 11$$

$$C = 680 \text{ kN}$$

Odabran je ležaj FAG 223110-E1-T41A(D) sa kN.

$$C < C_r$$

ZADOVOLJAVA

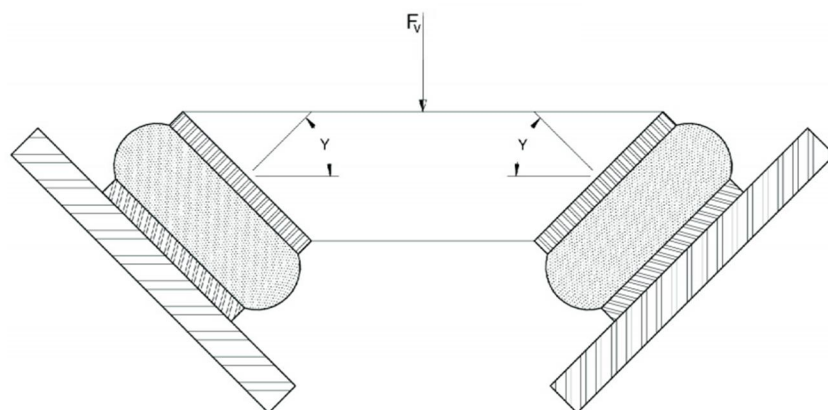


Slika 37. Konstruktivsko oblikovanje ležajnih mjesta prema [24.]

Prethodna slika prikazuje potrebno konstruktivsko oblikovanje ležajnih mjesta za ležajeve koji se podmazuju s masti, prema [24.]. U gornjem presjeku prikazana je izvedba čvrstog, a u donjem slobodnog ležajnog mjesta. Sa „A“ je označena priрубnica заштитне cijevi vratila, „B“ je žlijeb za nakupljanje masti, a „C“ označuje prostor u poklopcu gdje se također nakuplja mast. Proces montaže [24.] odvija se u dva koraka. Ležaj se prvo utisne u kućište. Kod većih ležaja potrebno je prethodno jednolično zagrijavanje kućišta. U slučaju da je potrebno zagrijati kućište kod montaže, nakon hlađenja ležaj s kućištem se navlači na vratilo.

5.1.7. Gumene opruge

Gumene opruge proračunate su prema preporukama iz kataloga proizvođača [26.]. U istom katalogu nalaze se podaci korišteni u ovom dijelu proračuna.



Slika 38. Skica za proračun iz kataloga [26.]

Kut pod kojim su opruge ugrađene iznosi 45° (u formuli iz kataloga označen sa γ).

Najveća vertikalna sila u drobilici iznosi:

$$F_v = 188900 \text{ N}$$

Formula za proračun krutosti gumenih opruga u smjeru djelovanja sile prema [26.]:

$$c_v = 2(c_c \cdot \sin^2 \gamma + c_s \cdot \cos^2 \gamma)$$

Za odabrane opruge oznake 1260G, dimenzija 125 x 60, tvrdoće 43 ShoreA, konstante krutosti (za tlak i smik) iznose:

$$c_c = 847 \text{ N/mm}$$

$$c_s = 140 \text{ N/mm}$$

Krutost u smjeru djelovanja sile (vertikalno):

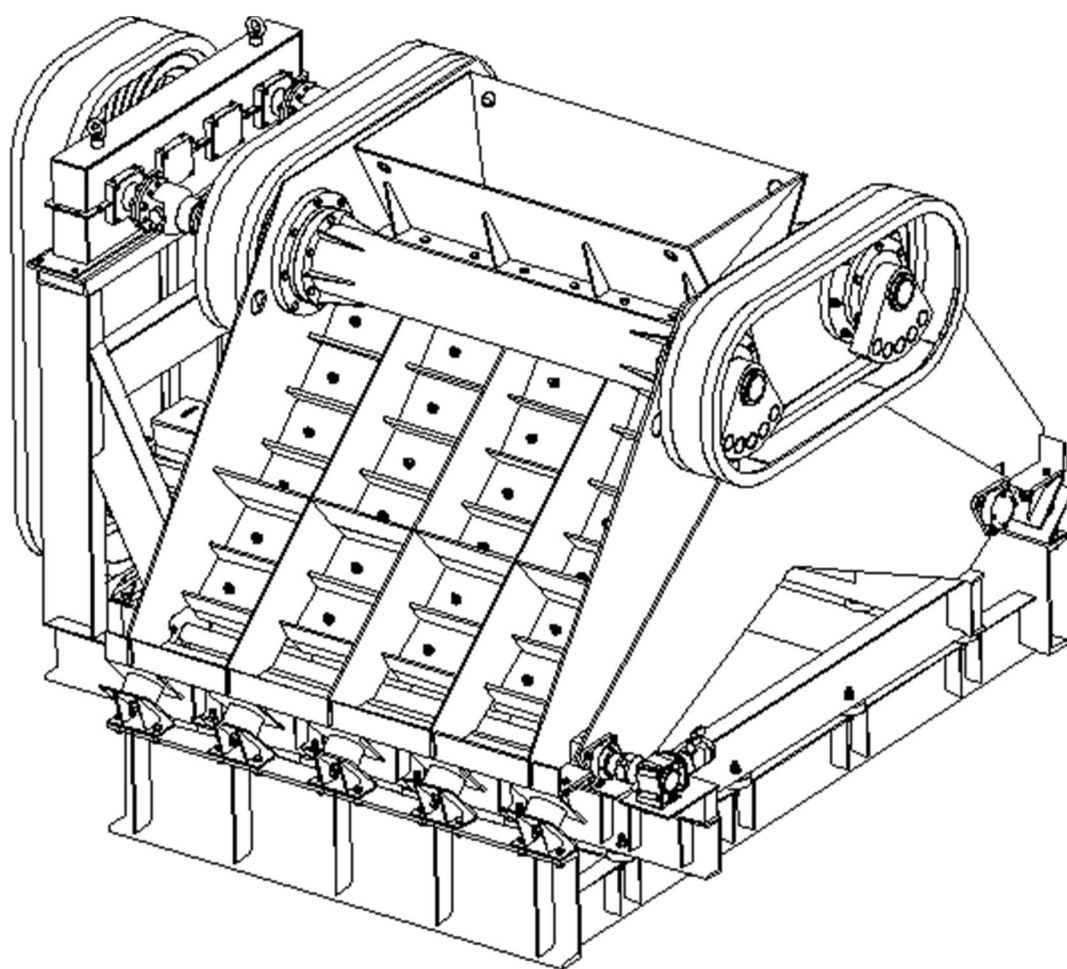
$$c_v = 2(847 \cdot \sin^2 45 + 140 \cdot \cos^2 45) = 987 \text{ N/mm}$$

Broj gumenih opruga:

$$z = 10$$

Maksimalna amplituda koju ostvaruje gornji radni okvir u tom slučaju iznosi:

$$y = \frac{F_v}{c_v \cdot z} = \frac{188900}{987 \cdot 10} = 19,14 \text{ mm}$$



Slika 39. Jedan od kasnijih modela drobilice

6. ZAKLJUČAK

Ovakva konstrukcija drobilice rješava neke osnovne probleme drobilica općenito, kao što su problem trošenja dijelova i ekonomičnosti. Kod ovog prototipa ne pogoni se izravno drobilni element koji je u dodiru s materijalom, već drobilica drobi svojom vlastitom težinom, a pogone se relativno mali utezi koji ne predstavljaju značajan otpor, a zbog velike brzine i načina vrtnje stvaraju veliku silu centrifugalnu silu koja djeluje u vertikalnom smjeru. Što se tiče trošenja dijelova koji su u dodiru s materijalom, njihova je trajnost velika, ne zbog upotrebe određenog materijala, već zbog mogućnosti da se nakon istrošenja jedne strane okrenu i dalje koriste s druge strane. Iako se u toku rada, zbog samog načina rada drobilice, širina ulaznog i izlaznog otvora mijenja, veličina izdrobljenog materijala je prilično ravnomjerna zbog položenosti krivulje udarnih ploha prema izlazu, koja omogućuje da materijal duže vrijeme prolazi kroz relativno istu širinu kanala, te zbog mogućnosti zadržavanja materijala podešavanjem zaklopke izlaznog otvora. Još jedna od prednosti je varijabilna konstrukcija koja omogućuje podešavanje centrifugalne sile izmjenom utega za fino balansiranje. Tu postoji i mogućnost izrade dodatnih glavnih utega za grubo balansiranje. Nešto većim izmjenama na drobilici možemo postići još veću varijabilnost, recimo konstruiranjem različitih dodatnih gornjih i/ili donjih okvira. Izmjenom gumenih opruga također možemo utjecati na amplitudu, zatim na materijal koji se drobi možemo utjecati tako da izradimo drugačiju nosivu konstrukciju donjeg radnog okvira, recimo promjenom nagiba ploha. Također, možemo utjecati na stupanj drobljenja. Primjerice, možemo ga povećati ili smanjiti drugačijom konstrukcijom gornjeg radnog okvira na način da povećamo ili smanjimo nagib i zakrivljenost zamišljene parabole na kojoj se nalaze udarne ploče, te tako dobijemo grublji ili finiji, veći ili manji produkt. Međutim, ove prednosti automatski vuku i neke probleme za sobom, doduše samo u fazi konstruiranja. Jedan od problema ove drobilice je velika međusobna zavisnost dijelova i sklopova, zbog koje se moralo često ponavljati neke dijelove proračuna, ponekad i većinu, i paralelno izmjenjivati konstrukciju. Uzmimo za primjer samo gumene opruge. Njihovom izmjenom utječe se na amplitudu, a ona ovisi o utezima za balansiranje, dok oni međusobno ovise o promjeru vratila, na čije dimenzije i utječu ovisno o maksimalnoj centrifugalnoj sili koju mogu stvoriti u radu. Sve se to događa kada uzmemo gumene opruge koje se razlikuju samo po tvrdoći, međutim možemo odabrati

gumene opruge drugih dimenzija. Tada, ovisno o njihovim dimenzijama, utječe se na razmak između udarnih ploha, odnosno širinu ulaznog i izlaznog otvora, budući da one nose gornji radni okvir, te međusobni položaj ostalih važnih dijelova. Tako da je u slučaju neke izmjene na drobilici, osim proračuna, potrebno napraviti i promjene u velikom dijelu konstrukcije, te međusobnom položaju određenih dijelova i sklopova.

PRILOZI

- I. CD-R disk
- II. Tehnička dokumentacija

LITERATURA

- [1] Tehnička enciklopedija, svezak 3, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1972.
- [2] Linarić, Z., „Postrojenja za proizvodnju gradiva, I. dio“
- [3] www.gradri.uniri.hr/adminmax/files/class/STR-11-STR_ZA_PRER_KAM.pdf
- [4] 74.52.124.226/~pms/index.php?option=com_rokdownloads&task=download&id=35%3Apredavanje_04_drobljenje_1&Itemid=99
- [5] Linarić, Z., „Građevinski strojevi - Leksikon osnovne građevinske mehanizacije“
- [6] www.iim.ftn.uns.ac.rs/kel/attachments/category/60/04_PRIPREMA%20SIROVINA_2.pdf
- [7] hr.wikipedia.org/wiki/Oplemenjivanje_mineralnih_sirovina
- [8] Decker K.-H., „Elementi strojeva“, Tehnička knjiga, Zagreb, 2006.
- [9] Krautov strojarški priručnik, Sajema, Zagreb, 2009.
- [10] Opalić M., Kljajin M., Sebastijanović S., „Tehničko crtanje“, Čakovec, 2003.
- [11] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., „Svojstva i primjena materijala“, FSB, Zagreb, 2006.
- [12] Horvat Z., „Mala zbirka zadataka iz „Elementi strojeva II““, FSB, Zagreb
- [13] Opalić M., Rakamarić P., „Reduktor“, FSB, Zagreb, 2001.
- [14] Horvat Z., „Vratilo (proračun)“, FSB, Zagreb
- [15] Stegić M., „Teorija vibracija“, FSB, Zagreb, 1996.
- [16] www.lenze.com
- [17] medias.ina.de/medias//hp?lang=en
- [18] www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-motor/Pages/electric-motor.aspx
- [19] 178.77.70.233/motox/?LANGUAGE=DE
- [20] bib.irb.hr/datoteka/321904.Remenski_pr.pdf
- [21] www.feris.hr/remeni.html
- [22] www.gewes.de/englisch/HTML_Produnkte_2/Katalog/p_4487.htm
- [23] www.traceparts.com/users/TracePartsOnline/index.asp
- [24] www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/library/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_197_de_en.pdf
- [25] www.tea-hamburg.de
- [26] www.avproductsinc.com/AVP_Catalog-new.pdf
- [27] www.michaud-chailly.fr